

Referências Bibliográficas

ABB, Heat transfer – Potential Operating problems. Disponível em: < www.abb.be/global/abbzh/abbzh251.nsf >. Acesso em: 06 Mar. 2005.

AHMADI, G.; JI, C.; SMITH, D.H., Numerical solution for natural gas production from methane hydrate dissociation, Journal of Petroleum Science and Engineering, no. 41(4), 269– 285, 2004

AZEVEDO, L.F.A. E TEIXEIRA, A.M., A Critical Review of the Modeling of Wax Deposition Mechanisms, Petroleum Science and Technology, 21, No.3 and 4, 393-408, 2003.

BARRERA ESCOBEDO, Jhoany Jhordann. Modelagem Transiente de Transferência de Calor em Dutos de Petróleo ou Gás, Termicamente Isolados. Dissertação de Mestrado, Dept. Engenharia Mecânica, PUC-RJ, 2005.

BARRERA, J. J.; NIECKELE, A. O.; AZEVEDO, L.F.A. Transient Thermal Analysis In Subsea Pipelines, Proc. of COBEM 2005, 18th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, MG, paper no. 0166, November 6-11, 2005.

BARRERA, J. J.; NIECKELE, A. O.; AZEVEDO, L.F.A. Analysis of the Transient Cooldown of Subsea Pipelines, Proc. of International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, no. 10554, 2006.

BARRERA, J. J., NIECKELE, A. O., AZEVEDO, L.F.A., 2006, Gas Cooldown Of Heavily Insulated Pipelines, Considering The Pipe Wall Thermal Capacitance, Proc. of CONEM 2006, Recife, PE, Brazil, paper no. 03-545, 2006b.

BIANCARDI ; FURTADO, A. F. ; CASTRO ; SILVA . Estudo da Cinética de Formação de Hidratos em Dutos de Petróleo pelo Método do Campo de Fase:

Influência dos Parâmetros do Modelo. Proceedings of the 11 Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering -- ENCIT 2006, 2006.

BILIR, S. E ATE, A. Transient conjugated heat transfer in thick walled pipes with convective boundary conditions , International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (14) , pp. 2701-2709, 2003.

BROWN, S.T., CLAPHAM, J., DANIELSON, T.J., HARRIS, R.G., ERICKSON, D.D., Application of a Transient Heat Transfer Model for Bundled Multiphase Pipelines, Pe 36610, Spe Annual Technical Conference, 1996.

CAMPO, A., Quick Algebraic Estimate of the Thickness of Insulation for the Design of Process Pipelines with Allowable Heat Losses to Ambient Air. Heat Transfer Engineering, vol. 23, no. 3, pp. 25-34, 2002.

CIAMPI M. et al. Mixed Convection Heat-Transfer In Horizontal Concentric Annuli For Transitional Flow Conditions, International Journal of Heat and Mass Transfer 30 (5): 833-841, May 1987.

CHIN Y. D. et al. Thermal Performance of an Insulated Multiple Flowline Bundle Using Active Heating, SPE 58971, 2000.

DANIELSON, T.J.; BROWN, L.D., An Analytic Model For A Flowing Bundle System,, SPE 56719, In: SPE Annual Technical Conference, 1999.

DWIGHT J., NIGEL M., JANARDHAN D., Prediction Of Cool Down Times And Designing Of Insulation For Subsea Production Equipment, Proceedings of OTC 16507, 2004.

ENERGY SOLUTIONS INC., Pipeline Studio v. 2.5, 2004.

FLUENT USER'S GUIDE, v. 6.2, Fluent Inc., New Hampshire, 2006

FORSDYKE, I. N., Flow Assurance in Multiphase Environments, SPE 37237, In: SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Houston, February, 18-21, 1997.

FOX, R. W. e MCDONALD, A. T., Introduction to Fluid Mechanics, McGraw-Hill, 2001.

GOLCZYNSKI, T.S., NIESEN, V.G. , Thermal Behavior During Restart of Ultradeepwater Flowlines, Production & Facilities, Society of Petroleum Engineers, paper 88443-PA, 19(2), pp. 59-66, 2004.

HAUSNER M.; DIXON M., Optimized Design of Pipe-in-Pipe Systems, OTC 14182, 2002.

HABIB, M.A.; NEGM, A.A., A Laminar Mixed Convection In Horizontal Concentric Annuli With Non-Uniform Circunferential Heating, Heat And Mass Transfer 37 (4-5): 427-435, Jul. 2001.

HIEBER, C. A.; SREENIVASAN S. K., Mixed Convection in an Isothermally Heated Horizontal Pipe, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 17, pp. 1337-1348, 1974.

HIGHT, M.; JANARDHAN D., Economic Considerations for Flowline Heat Loss Control, OTC 12036, In: Offshore Technology Conference , Houston, 2000.

HISHIDA M.; NAGANO Y., MONTESCLAROS M. S., Combined forced and free-convection in the entrance region an isothermally horizontal pipe, Journal of heat transfer-transactions of the ASME 104 (1): 153-159, 1982.

HO, C. J.; LIN, Y. H., Natural Convection Heat Transfer of Cold Water within an Eccentric Horizontal Cylindrical Annulus, Journal of Heat Transfer, Vol.112, Pp. 117-123, 1990.

HOLMAN, J. P. Heat Tranfer. McGraw-Hill Kogakusha Ltd., 1976.

HOSSEINI R.; HEYRANI-NOBARI M. R.; HATAM M., An Experimental Study of Heat Transfer in an Open-ended Vertical Eccentric Annulus with Insulated and Constant Heat Flux Boundaries. Applied thermal engineering 25 (8-9): 1247-1257, 2004.

INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley, 4a. Ed. 1998.

JANOFF D.; MCKIE N.; DAVALATH J., Prediction of Cool Down Times and Designing of Insulation for Subsea Production Equipment, OTC 16507, 2004.

KAYS, W.M.; CRAWFORD, M.E., *Convective Heat and Mass Transfer*, 2nd Edition, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1980.

KNUDSEN, J.G., KATZ, D.L., Fluid Dynamics and Heat Transfer, McGraw Hill Book Co., New York City, 1958.

KUAN-TZONG L.; WEI-MON Y., Transient conjugated mixed convection inside ducts with convection from the ambient, International Journal of Heat and Mass Transfer, 39 (6), pp. 1203-1211, 1996.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D.B., The Numerical Computation of Turbulent Flows, Computational Methods of Applied Mechanical Engineering. Vol. 3, pp. 269-287, 1974.

LIN, D.; NANSTEEL, N. W., Natural Convection Heat Transfer in a Vertical Annulus Containing Water Near The Density Maximum, Journal of Heat Transfer, Vol. 109, Pp. 899-905, 1987.

MAHFOUZ, F.M., Transient Free Convection from a Horizontal Cylinder Placed in a Micropolar Fluid, J. Heat And Mass Transfer 39 (5-6): 455-462 Jun. 2003.

MATZAIN, A.; APTE, M. S. ; ZHANG, H-Q. VOLK, M. E BRILL, J. P., Investigation of Paraffin Deposition During Multiphase Flow in Pipelines and Wellbores—Part 1: Experiments, Journal of Energy Resources Technology, 124(3), pp. 180-186, 2002.

MORCOS S. M.; BERGLES A. E., Experimental investigation of combined forced and free laminar convection in horizontal tubes. Journal of heat transfer-transactions of the ASME 97 (2): 212-219, 1975.

NIECKELE A.O., PATANKAR S.V., Laminar Mixed Convection in a Concentric Annulus with Horizontal Axis. Journal Of Heat Transfer-Transactions of The Asme 107 (4): 902-902, 1985.

NUTTALL R. H.; ROGERS M.G., Insulated Pipe-in-Pipe Subsea Hydrocarbon Flowlines, OMAE 98-0610, 1998.

OSIADACZ A.J.; CHACZYKOWSKI M. Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow models. Chemical Engineering Journal 81 (1-3): 41-51 january 2001.

PATANKAR, S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

PATANKAR, S.V. & SPALDING, D.B.; A Caulculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flow, International Journal Heat Mass Transfer, Vol.15, p.1787, 1972.

PRICE, G. R.; McBRIEN, R. K.; RIZOPOULOS, S. N.; GOLSHAN, H. Evaluating the Effective Friction Factor and Overall heat Transfer Coefficient During Unsteady Pipeline Operation. Journal of Offshore Mechanics and Artic Enginnering, v. 121, p. 131-136, 1999.

RUBEL M.T.; BROUSSARD D.H., Flowline Insulation Thermal Requirements for Deepwater Subsea Pipelines. SPE 28481. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, September 1994.

SCANDPOWER PETROLEUM TECHNOLOGY, OLGA 2000 Transient Multiphase Flow Simulator. Disponível em: <www.olga2000.com/capabilities>

SHOME B.; JENSEN M. K., Mixed convection laminar-flow and heat-transfer of liquids in isothermal horizontal circular ducts. International Journal of Heat and Mass Transfer 38 (11): 1945-1956, 1995.

SU, F, PRASAD, R.C. A Transient Experimental Method To Determine The Overall Heat Transfer Coefficient In A Concentric Tube Heat Exchanger, Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 5, Pp. 603-614, 2003.

TAXY, S., LEBRETON, E., Use of Computational Fluid Dynamics to Investigate the Impact of Cold Spots on Subsea Insulation Performance. OTC 16502, Offshore Technology Conference, Houston, 3-6 May 2004.

TAKEUCHI, M. E CHENG' K. C. , Transient natural convection in horizontal cylinders with constant cooling rate, *Journal of Heat and Mass Transfer*, 9(4) pp. 215-225, 2005.

TODI, S., DEO, M. Experimental and Modeling Studies of Wax Deposition in Crude Oil Carrying Pipelines, *Proceedings of 2006 Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, USA, May, 2006, OTC 18368, 2006.

VAN DOORMAAN, J.P. & RAITHBY, G.D.; Enhancements of The SIMPLE Method for Prediction Incompressible Fluid Flow, *Numerical Heat Transfer*, Vol.7, pp.147-163, 1984.

VASSEUR, P., ROBBILARD, L. CHANDRA SHECAR, B., Natural Convection Heat Transfer of Water within a Horizontal Cylindrical Annulus with Density Inversion Effects, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 117-123, 1983.

YAMAMOTO, S.; NIIYAMA D.; SHIN B. R., A numerical method for natural convection and heat conduction around and in a horizontal circular pipe. *International journal of heat and mass transfer* 47 (26): 5781-5792, 2004.

YOUSEF W.W.;TARASUK J.D., Free Convection Effects on Laminar Forced Convective Heat Transfer in a Horizontal Isothermal Tube. *Journal of Heat Transfer*, Vol. 104, p p. 145-152, 1982.

ZHOU J.Y.; ADEWUMI M.A. Simulation of transients in natural gas pipelines. *SPE Production & Facilities* 11 (4), pp. 202-208, 1996.

A1

Teste de Malha

Para definição da malha a ser utilizada, foi realizado um teste de malhas, o qual consistiu em comparar os resultados obtidos com três malhas, utilizando o modelo 2D, calculando as diferenças entre estes. Foram selecionadas 3 malhas, com a distribuição de elementos como indicado na Tabela A1.1. A malha intermediária, Malha 2, encontra-se ilustrada na Fig. A1.1. A Malha 3 possui um pouco mais que o dobro do número de pontos da Malha 2, a qual possui aproximadamente, 2,6 pontos da Malha 1.

Tabela A1.1 – Distribuição da malha

	Núcleo do fluido	Parede de aço	Parede de Isolante	Total
Malha 1	900	90	540	1530
Malha 2	2500	200	1500	4200
Malha 3	5625	225	3375	9225

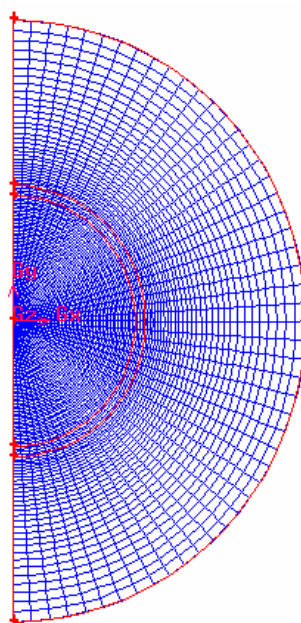


Figura A1.1 – Malha na seção transversal

A Fig. A1.2 ilustra a variação da temperatura média na seção transversal, T_m , com o tempo, obtida com a três malha, para um caso típico de resfriamento analisado. No presente caso, o fluido no interior da tubulação é óleo Albacora. A determinação das condições do presente teste encontram-se definidas no Capítulo 3.

Analisando a Fig. A1.2 observa-se uma que os resultados obtidos com a Malha 2 são bastante próximos aos obtidos com a malha mais fina. Como é de se esperar, o afastamento entre as soluções cresce a medida que o tempo passa. Após 5 horas de resfriamento a diferença entre as temperaturas médias é de 2,64% entre a Malha 1 e Malha 2 e de 0,81% entre a Malha 3 e Malha 2.

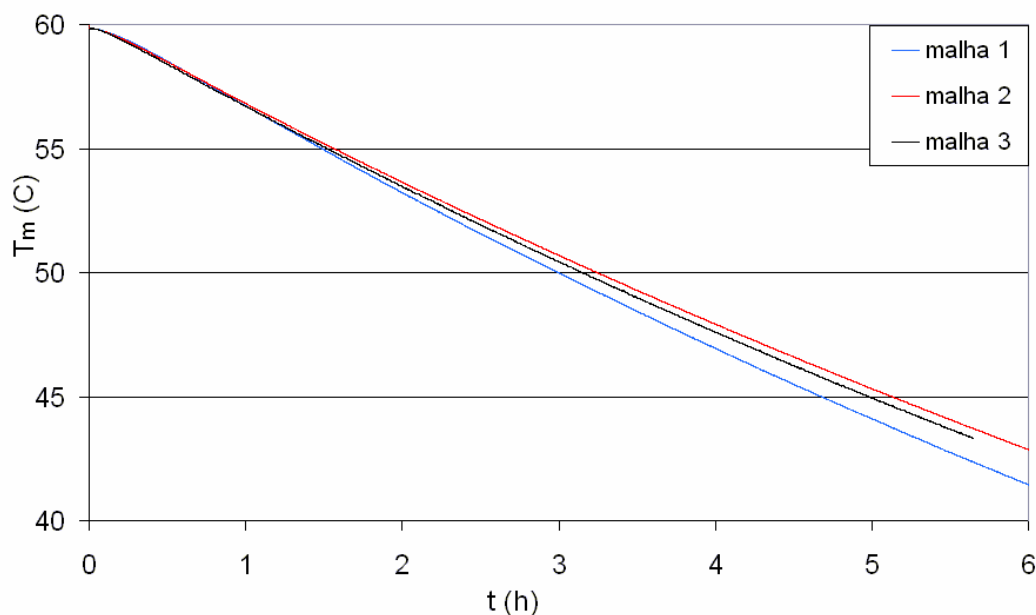
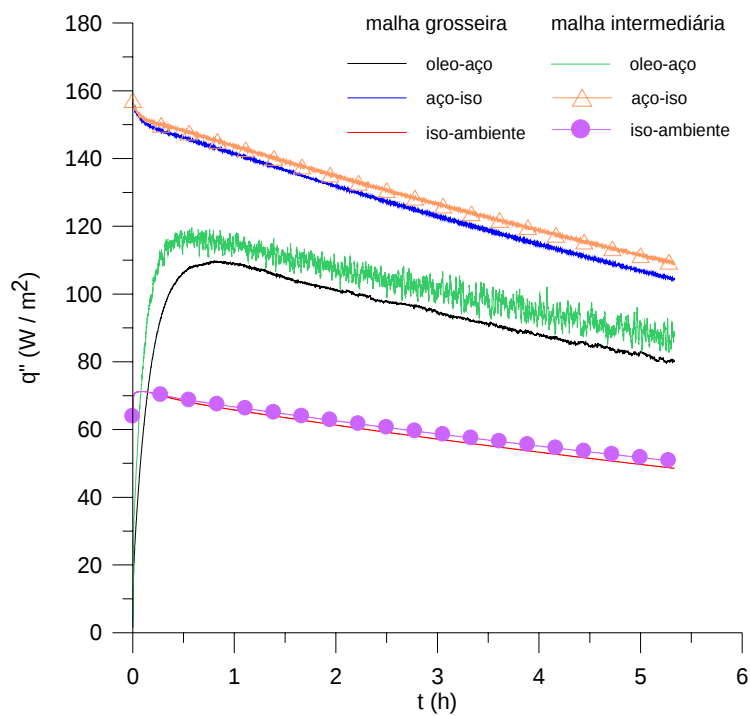
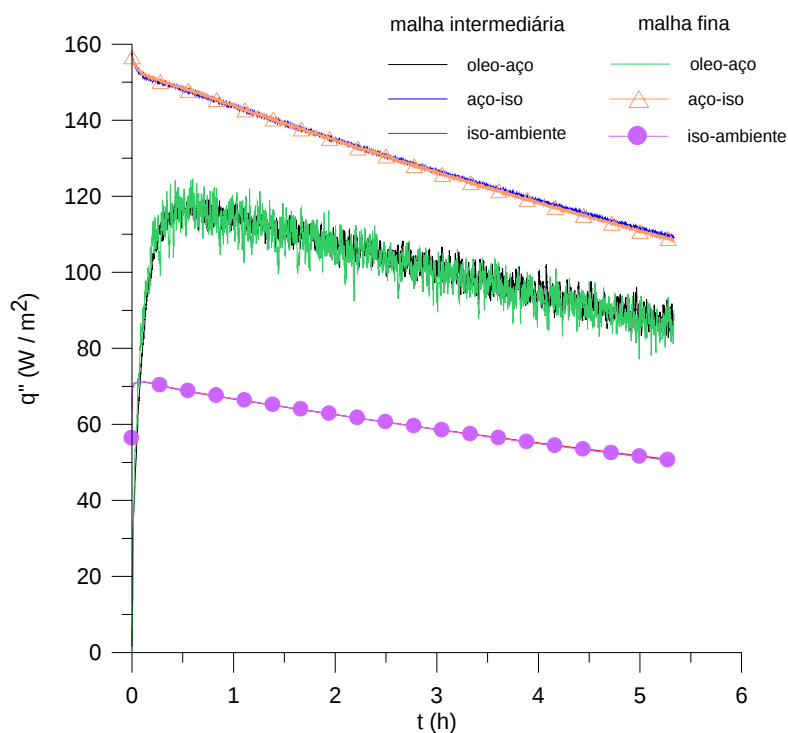


Figura A1.2 – Teste de malha. Variação da temperatura de mistura com o tempo

Para complementar o teste, investigou-se a influência da malha na variação do fluxo de calor através das camadas do duto com o tempo. A Fig. A1.3a ilustra uma comparação entre a Malha 1 e Malha 2, enquanto a Fig. A1.3b apresenta a comparação entre a Malha 2 e Malha 3. Na legenda das figuras, *óleo* corresponde a interface entre o fluido e o duto de aço, enquanto que *aço* corresponde a interface entre o aço e o isolante e *iso* refere-se a superfície externa da tubulação. O subscrito 1, 2 e 3 referem-se as malhas.



a) Comparação entre Malha 1 e Malha 2



b) Comparação entre Malha 2 e Malha 3

Figura A1.3 – Teste de malha. Variação do fluxo de calor com o tempo

Analisando os dados da Fig. A1.3 observa-se o mesmo comportamento qualitativo para o fluxo de calor médio através de cada superfície. Nota-se, no

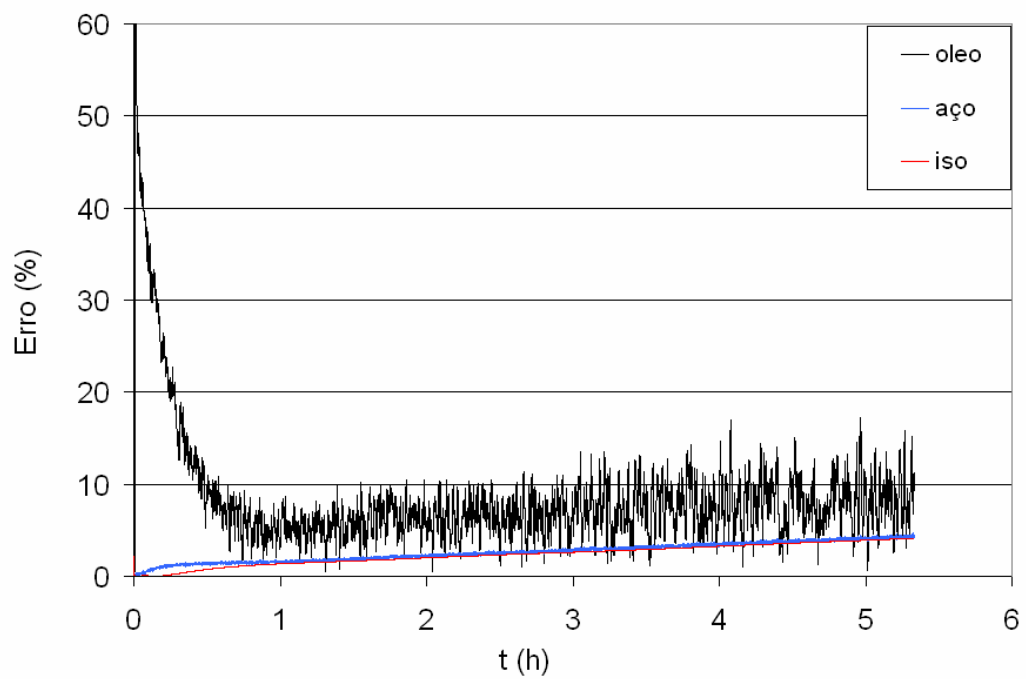
entanto, um pequeno afastamento entre as soluções obtidas com as Malhas 1 e 2. Já para as Malhas 2 e 3, pode-se observar que a diferença de resultados é muito pequena.

A Figura A1.4 ilustra os erros médios para os fluxos de calor através das camadas do duto. A Fig. A1.4a e Fig. A1.4b correspondem a comparação entre as Malhas 1 e 2 e Malhas 2 e 3, respectivamente. Observa-se que uma maior discrepância entre os resultados na parede interna do aço em contato com o óleo, somente no começo do transiente, sendo a diferença diminui muito mais rapidamente com o uso da malha mais fina, onde grandes diferenças somente são observadas nos primeiros 12 minutos. Os erros médios dos fluxos entre as Malhas 1 e 2 foram de 8,47, 2,63 e 2,35% para os fluxos através das camadas de óleo, aço e isolante, respectivamente. Já os erros médios dos fluxos, através das fronteiras de óleo, aço e isolante, entre as Malhas 2 e 3 foram bem inferiores, sendo iguais a 3,19%, 0,23% e 0,18%, respectivamente. Com isso, a utilização da Malha 3 (malha fina) foi descartada, pois apresentou resultados bem próximos aos valores apresentados quando utilizada a Malha 2 (intermediária) além de exigir um esforço e tempo computacional muito maior.

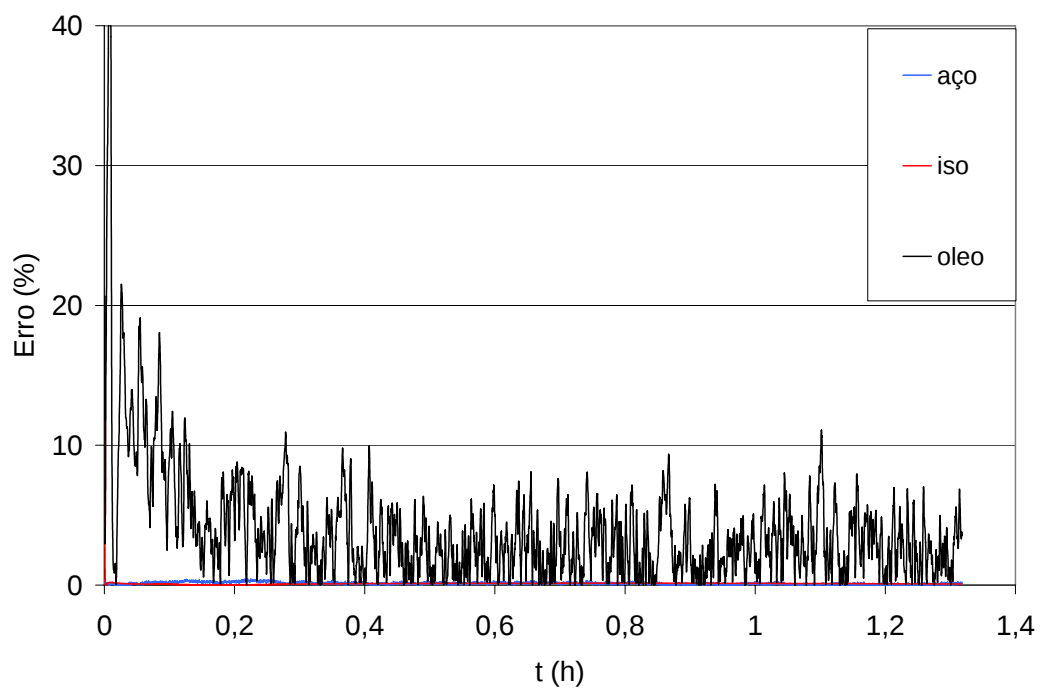
Utilizando a Malha 1 e o mesmo óleo, a Fig. A1.5 ilustra um teste de passo de tempo para observar a sua influência nos resultados do fluxo de calor através das camadas do duto. Por ser mais crítico, o fluxo através da superfície interna do duto foi selecionado para o teste. Pode-se observar através do gráfico que o passo de tempo 1s é um passo razoável a ser selecionado.

Com o objetivo de otimizar o método numérico utilizado, reduzindo o tempo computacional sem afetar os resultados de forma significativa, a malha intermediária foi selecionada para ser utilizada na seção transversal dos dois casos analisados (o caso 2D e 3D).

Para o caso do gás foi utilizada a mesma malha selecionada a partir do teste de malha, mas devido a maiores variações da temperatura com o tempo, foi necessário diminuir o passo de tempo, para garantir independência da solução no passo temporal e auxiliar no processo de convergência. Neste caso utilizou-se um passo de tempo de 0,05 s.



a) Comparação entre Malha 1 e Malha 2



b) Comparação entre Malha 2 e Malha 3

Figura A1.4 – Erro médio percentual na variação do fluxo de calor com o tempo

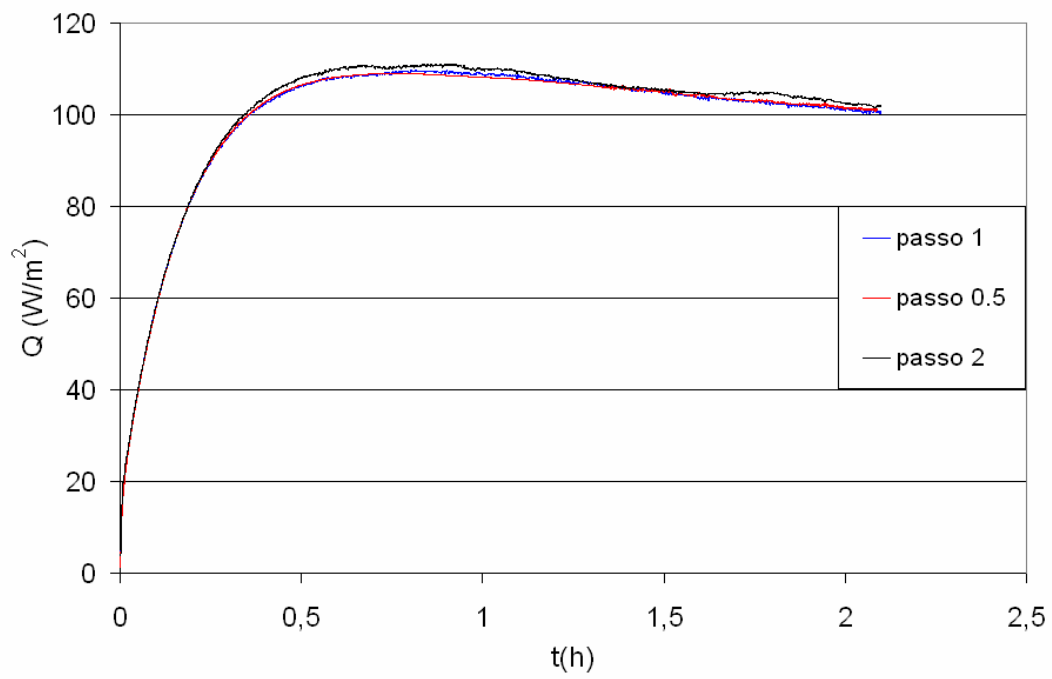


Figura A1.5 – Teste de passo de tempo. Variação do fluxo de calor com o tempo