

## Referências Bibliográficas

AKANKSHA., PANT, K. K., SRIVASTAVA, V. K., **Mass transport correlation for CO<sub>2</sub> absorption in aqueous monoethanolamine in a continuous film contactor.** Chem. Eng. & Processing. 47(5), 920-928, 2008.

AKANKSHA., PANT, K. K., SRIVASTAVA, V. K., **Carbon dioxide absorption into monoethanolamine in a continuous film contactor.** Chem. Eng. J. 133, 229-237, 2007.

ALBERTA RESEARCH COUNCIL., THE DELPHI GROUP., **Building capacity for CO<sub>2</sub> capture and storage in the apec region.** Canada, 2005.

ALIE, C. F., **CO<sub>2</sub> capture with MEA: Integrating the absorption process and steam cycle of an existing coal-fired power plant.** M.Sc. Thesis, University of Waterloo, Canada, 2004.

AMES, W. F., **Numerical methods for partial differential equations.** Great Britain, 1969.

AZEVEDO, G. G., **Simulação e projeto de uma coluna de absorção com reação química sistema CO<sub>2</sub>/Monoentanolamina.** M.Sc. Teses, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1996.

BEJAN, A., **Transferência de calor.** São Paulo, Edgard Blucher, 2004.

BIRD, B. R., STEWART, E. W., LIGHTFOOT, N. E., **Transport phenomena.** 2<sup>nd</sup> Edition, New York, Hamilton Printing, 2002.

BOSCH, H., VERSTEEG, G. F., VAN SWAAIJ, W. P. M., **Gas-liquid mass transfer with parallel reversible reaction-III. Absorption of CO<sub>2</sub>**

**into solutions of blends of amines.** Chem. Eng. Sc. 44(11), 2745-2750, 1989.

BRAVO, J. L., FAIR, J. R., **Generalized correlation for mass transfer in packed distillation columns.** Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev. 21, 162-170, 1982.

BRENNEN, C. E., **Fundamental of multiphase Flow,** Cambridge U. Press, 2005.

BURDEN, L. R., FAIRIES, D. J., **Numerical analysis.** Boston, PWS Publishing Company, 1993.

CARLOSON, B. S., CANTER, S., JENKINS, J., **Cannadian gas treating solvent quality control-unique challenges.** Houston, Texas, CCR Technologies Ltd, 77031, 2001.

COPPE., **Emissoes de gases de efeito estufa por queima de combustiveis.** Rio De Janiro, UFRJ, 2006.

DABIR, B., RIAZI, M. R., DAVOUDIRAD, H. R., **Modelling of falling film reactors.** Chem. Eng. Sci. 51(11), 2553-2558, 1996.

DAVIS, E. J., OUWERKERK, M. V., VENKATESH, S., **An analysis of the falling film gas-liquid reactor.** Chem. Eng. Sci. 34(4), 539-550, 1979.

EIA., DOE., **International energy outlook 2009.** U.S. Department of Energy., Washington, DC, Energy Information Administration, 2009.

FIGUEROA, J. D., FOUT, T., PLASYNSKI, S., MCLLURIED, H., SRIVASTAVA, R. D., **Advances in CO<sub>2</sub> capture technology. The U.S. Department of Energy's carbon sequestration program.** International Journal of Greenhouse Gases control. 2, 9-20, 2008.

FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W., MAUS, L., ANDERSEN, L. B., **Principles of unit operations.** 2<sup>nd</sup> Edition, Tokyo, Toppan Company LTD, 1960.

GLASSCOCK, D. A., ROCHELLE, G. T., **Numerical simulation of theories for gas absorption with chemical reaction.** AIChE J. 35(8), 1271-1281, 1989.

GUPTA, M., COYLE, I., THAMBIMUTHU, K., **CO<sub>2</sub> capture technologies and opportunities in Canada.** Alberta, Canada, 1<sup>st</sup> Canadian CC&S Technology Roadmap Workshop. 2003.

GUTIERREZ, J., MANS, C., COSTA, J., **Improved mathematical model for a falling film sulphonation reactor.** Ind. Eng. Chem. Res. 27, 1701-1707, 1988.

HENSTOCK, W. H., HANRATTY, T. J., **The interfacial drag and the height of the wall layer in annular flows.** AIChE J. 22(6), 990-1000, 1976.

HIKITA, H., ASAI, S., KATSU, Y., IKUNO, S., **Absorption of carbon dioxide into aqueous monoethanolamine solutions.** AIChE J. 25(5), 793-800, 1979.

IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY., **CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustions.** Paris, 2009.

IEA INTERNATIONAL ENERGY AGENCY., **Prospects for CO<sub>2</sub> capture and storage.** Paris, 2004.

ISMAIL, T., **Modelling in transport phenomena.** 1st Edition, Amsterdam, Elsevier Science BV, 2002.

JOHNSON, G. R., CRYNES, B. L., **Modelling of a thin film sulphur trioxide sulphonation reactor.** Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 13, 6-14, 1974.

KIM, H., JEON, Y., KIM, S., **The simulation of CO<sub>2</sub> absorption with MEA solution.** Busan, Korea, 6<sup>th</sup> Korea-China Workshop on clean Energy Technology, 2006.

KOHL, A. L., NIELSEN, R. B., **Gas purification**. 5<sup>th</sup> Edition, Houston, Texas, Gulf Publishing Company, 1997.

KOLEV, I. N., **Multiphase flow dynamics 2 thermal and mechanical interactions**. 2<sup>nd</sup> Edition, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2005.

LUDWING, E. E., **Applied process design for chemical and petrochemical Plants**. 3<sup>rd</sup> Edition, Vol. 3, Houston, Texas, Butterworth-Heinemann, 1999.

MARON, H. S., PRUTTON, F. C., **Principles of physical chemistry**. 4<sup>th</sup> Edition, New York, The Macmillan, 1965.

MIGITA, H., SOGA, K., MORI, Y. H., **Gas absorption in a wetted-wire column**. AIChE, J. 51(8), 2190-2198, 2005.

MOURE, G. T., **Tecnologias de seqüestro de carbono para mitigação das mudanças climáticas colóquio anual de engenharia química**. COPPE. UFRJ, 2008.

NEVES, S. B., **Captura de CO<sub>2</sub>: Tecnologias para a separação de CO<sub>2</sub> de correntes industriais gasosas**. Seminario brasileiro sobre sequestro de carbono e mudanças climaticas, Mini-Curso, Natal, 1-96, 2007

NIELSEN, C. H. E., KIIL, S., THOMSEN, H. W., JOHANSEN, K. D., **Mass transfer in wetted-wall columns: correlations at high Reynolds numbers**. Chem. Eng. Sci. 53(3), 495-503, 1998.

PAO, Y. C., **Engineering analysis**. CRC Press LLC, 1<sup>st</sup> Edition, New York, 1999.

PATANKAR, S. V., **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

PERRY, R. H., GREEN, D. W., MALONEY, J. O., **Perry's chemical engineers' handbook**. 7<sup>th</sup> Edition, New York, McGraw-Hill, 1997.

REID, R. C., PRAUSNITZ, J. M., SHERWOOD, T. K., **The properties of gases and liquids**. 3<sup>rd</sup> Edition, New York, McGraw-Hill, 1977.

ROHSENOW, M. W., HARTNETT, P. J., CHO, I. Y., **Handbook of heat transfer**. 3<sup>rd</sup> Edition, New York, McGraw-Hill, 1998.

SCHLUMBERGER., **Carbon dioxide capture and storage**. Disponível em: <<http://www.seed.slb.com/subcontent.aspx?id=4148>>. Acesso em 10 jan. 2008.

VERSTEEG, G. F., KUIPERS, J. A. M., VAN BECKUM, F. P. H., VAN SWAAIJ, W. P. M., **Mass transfer with complex reversible chemical reaction-I single reversible chemical reaction**. Chem. Eng. Sc. 44(10), 2295-2310, 1989.

WARREN, M. R., JAMES, P. H., YOUNG, I. C., **Handbook of Heat Transfer**. 3<sup>rd</sup> Edition, New York, McGraw-Hill Professional, 1998.

YANG, H., XU, Z., FAN, M., GUPTA, R., SLIMANE, R. B., BLAND, A. E., WRIGHT, I., **Progress in carbon dioxide separation and capture: A review**. Journal of Environmental Sciences, 20, 14-27, 2008.

## APÊNDICE A

Para selecionar a malha a ser utilizada, de forma a obter a precisão desejada com baixo esforço computacional, é necessário investigar a influência na solução de distintas malhas, de forma a garantir a independência da solução com a malha computacional. Neste trabalho foram testadas três malhas, no mesmo domínio computacional (mesma geometria), com uma distribuição e quantidade de nós computacionais como indicado na Tabela. 4.1 (repetida aqui por conveniência) e com uma secção transversal como é mostrada na Fig. 4.3.

Tabela 4.1- Teste de malha

	Total de nós	Nós na seção radial	Nós na direção vertical
Malha 1	6.006	6	1.001
Malha 2	11.011	11	1.001
Malha 3	22.011	11	2.001

O caso selecionado para serem testados corresponde ao Caso primeiro, descrito no Capítulo 5, selecionadas as velocidades menor e maior de gás ( $u_G$ ).

### A.1. Perfis de Concentração de CO<sub>2</sub>

A grandeza utilizada para comparação nos testes da malha foi a concentração de CO<sub>2</sub> na região de gás ao longo da coluna. A Figura A.1 ilustra os perfis da concentração CO<sub>2</sub> para a velocidade mínima de gás, onde, pode-se observar que a Malha 2 (cor vermelha) apresenta perfis bem próximos aos perfis obtidos com a malha mais fina, Malha 3 (cor azul). Resultados similares são obtidos para os perfis dos testes utilizando-se a velocidade máxima de gás, como apresentado na Figura A.2.

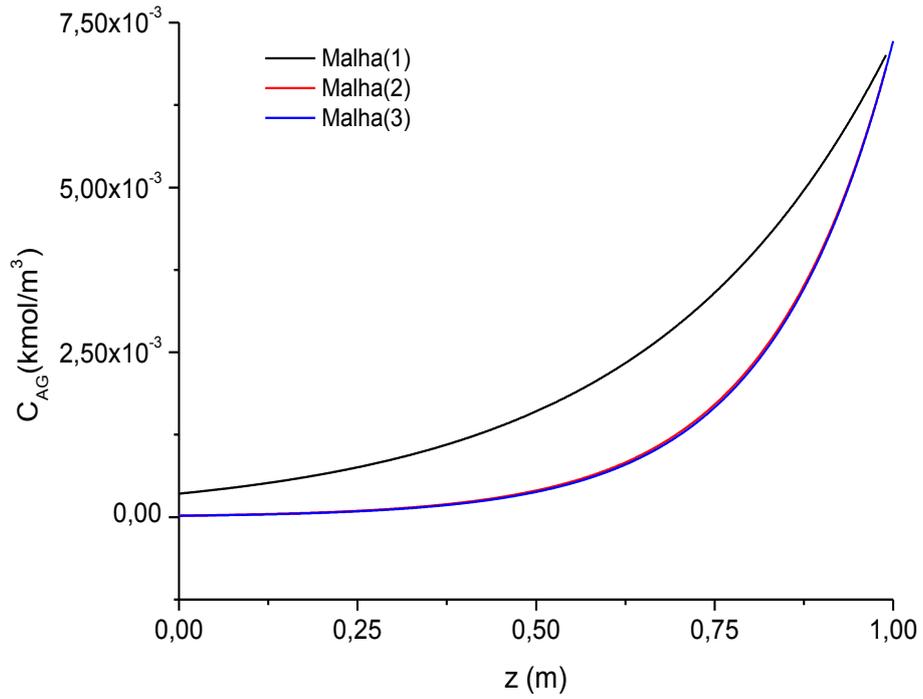


Figura A.1- Perfis da concentração na região do gás ao longo da coluna, para  $u_L=0,0412\text{m/s}$  e  $u_G=0,11\text{m/s}$

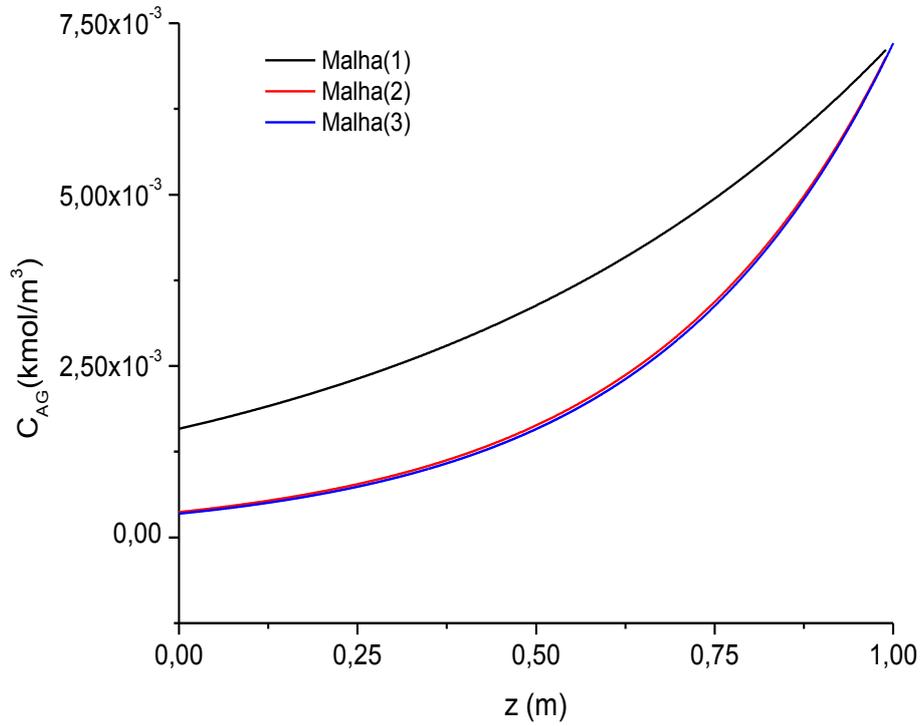
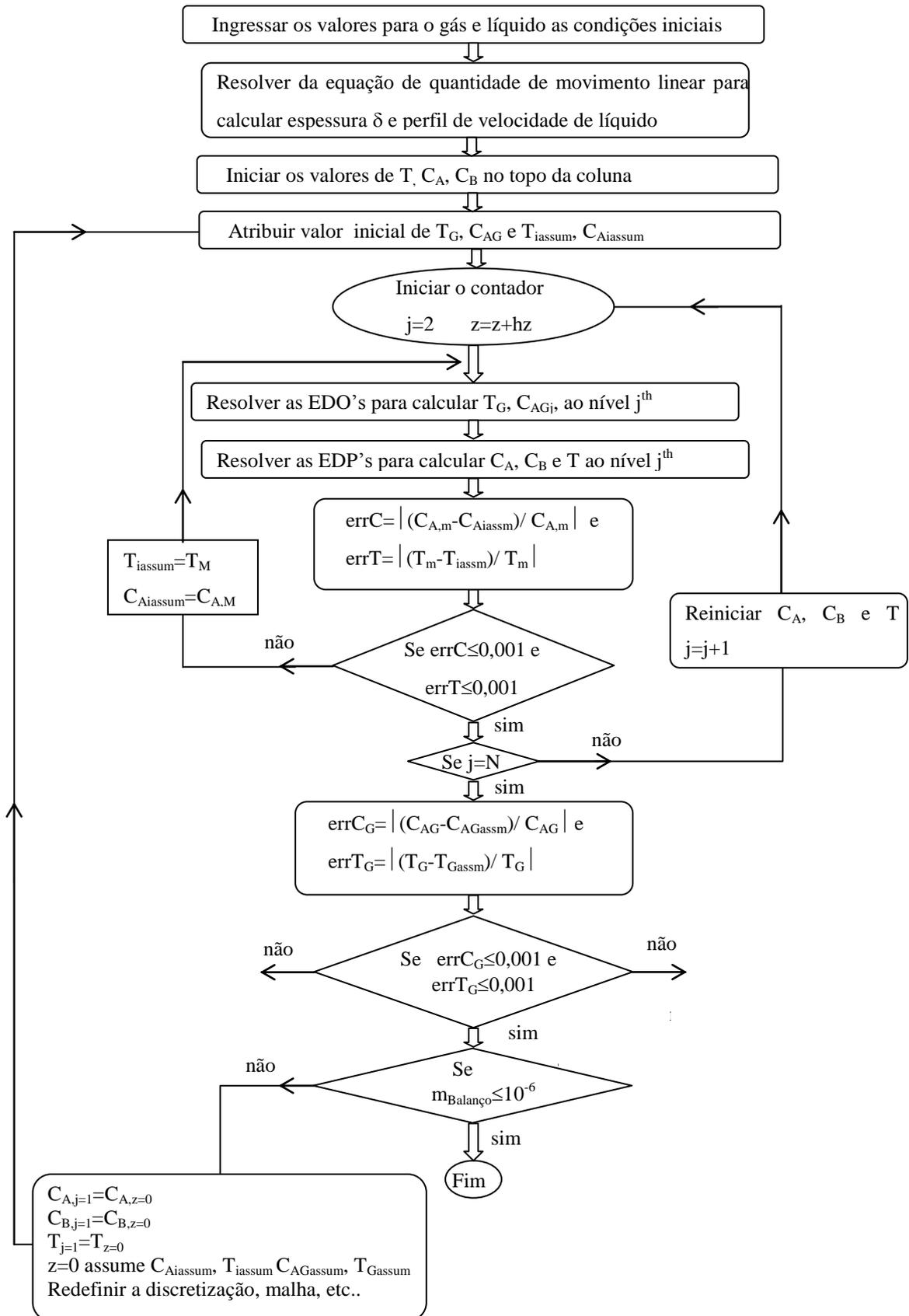


Figura A.2- Perfis da concentração na região do gás ao longo da coluna, para  $u_L=0,0412\text{m/s}$  e  $u_G=0,35\text{m/s}$

## A.2. Formas de Representação de Algoritmos

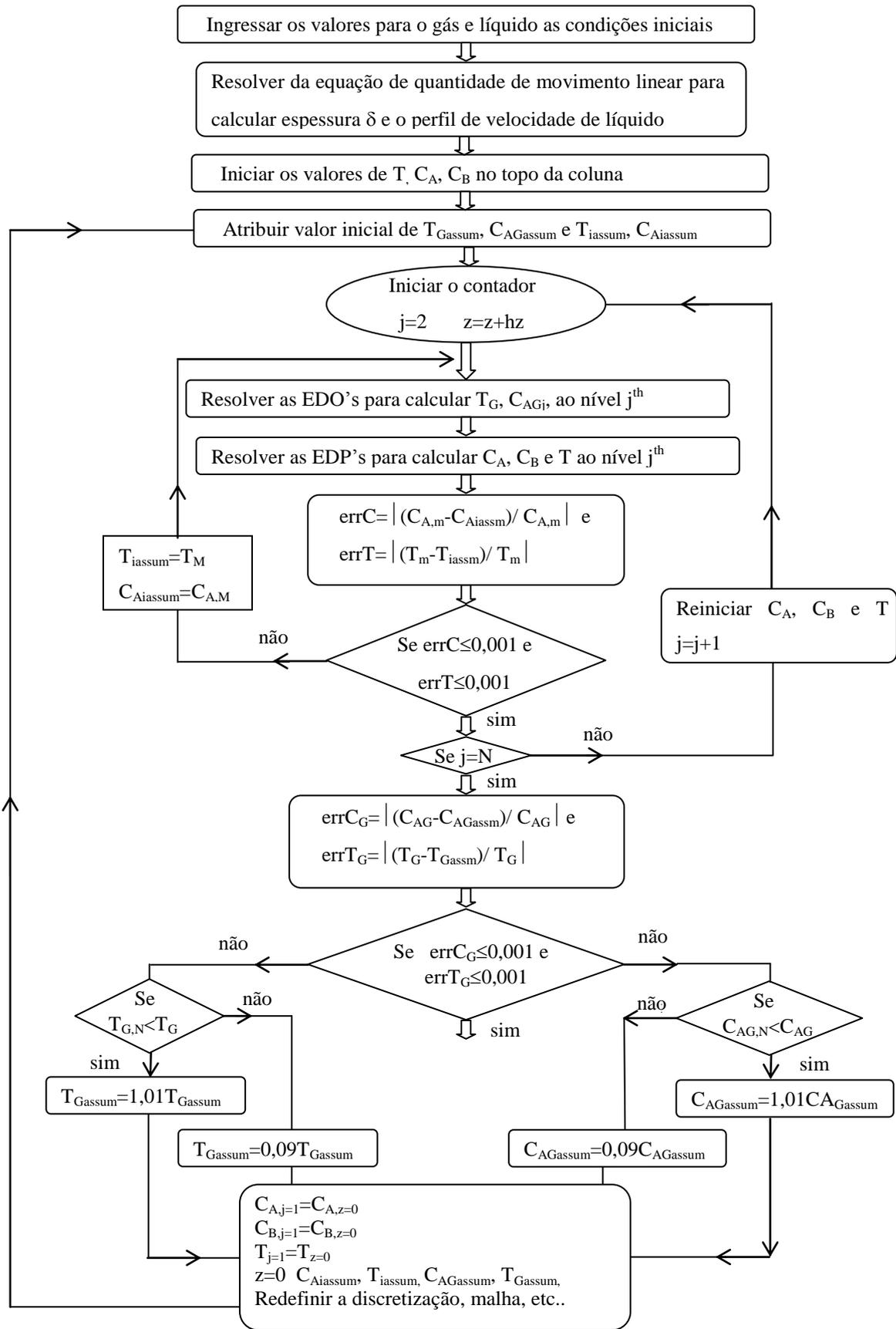
Uma representação gráfica de algoritmos pode ser obtida por meio de fluxogramas, onde formas geométricas diferentes implicam ações (instruções comandos) distintas. Tal propriedade facilita o entendimento das idéias contidas nos algoritmos, e a seguir são descritas as etapas seguidas e, logo, a representação do algoritmo por meio dos Fluxogramas A.1 e A.2

- 1- Início do programa;
- 2- Resolver a equação de quantidade de movimento linear para calcular a espessura e o perfil da velocidade de filme líquido;
- 3- Iniciar o programa usando a temperatura, concentrações na região de líquido no topo da coluna;
- 4- Atribuir tentativamente valores iniciais para a temperatura e concentração na região de gás e na interface no topo da coluna;
- 5- Especificar o domínio computacional (malha);
- 6- Resolver as EDO's da região de gás;
- 7- Resolver as EDP's da região de líquido;
- 8- Avaliar as tolerâncias usadas para a temperatura e concentração na interface gás-líquido.
- 9- Se as tolerâncias relativas forem satisfeitas, avançar os cálculos para a próxima linha da malha, caso contrario voltar ao passo 6 e realizar as iterações ate satisfazer as tolerâncias especificadas
- 10- Se o processo de resolução das equações se encontrarem na ultima linha, avaliar as tolerâncias para a temperatura e para concentração na região de gás, caso contrario continuar com o processo de resolução das equações ate chegar à última linha.
- 11- Se as tolerâncias relativas forem menores ou iguais a 0,001, verificar o balanço de massa das espécies, caso contrario reiniciar o processo com os valores de temperatura e concentração, voltando ao passo 4.
- 12- Se o balanço de massa das espécies for menor ou igual a  $10^{-6}$  kg/s encerrar o processo, caso contrario iniciar o passo 3, redefinir a malha ou a discretização das equações.



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611786/CA

Fluxograma A.1- caso os resíduos relativos da região de gás sejam menores ou iguais do que 0,001



Fluxograma A.2-, caso os resíduos relativos da região de gás sejam maiores do que 0,001