

# Capítulo 5

## Conclusões

A simulação de tempos curtos contorna as dificuldades associadas ao longo tempo de correlação dos sistemas críticos em equilíbrio, uma vez que as medidas são realizadas nos primeiros passos de Monte Carlo, muito antes que o sistema alcance o equilíbrio térmico e o comprimento de correlação cresça demais. Nesse caso não é necessário esperar por configurações independentes que respeitem o conceito de ergodicidade e sim, trabalhar com inúmeras amostras diferentes sobre as quais as médias são calculadas.

Além de representar uma alternativa para o cálculo dos expoentes críticos estáticos ( $\beta$  e  $\nu$ ) e dinâmico ( $z$ ), essa abordagem amplia a descrição dos fenômenos críticos ao detectar a existência de um novo expoente dinâmico ( $\theta$ ), independente de todos os demais, que descreve a importância das condições iniciais impostas ao sistema (“critical initial slip”). Não somente as relações de escala dinâmicas apontam a existência desse expoente, mas também o estudo da correlação temporal da magnetização<sup>51</sup> apresenta-se como uma técnica eficaz para tal investigação.

A primeira parte desta dissertação verificou a eficiência da abordagem de tempos curtos no estudo do modelo de Baxter-Wu<sup>36,37</sup> (que está na mesma

classe de universalidade do modelo de Potts com 4 estados), definido em uma rede bidimensional triangular cujas variáveis (tipo Ising) interagem por plaquetas (produto dos três spins). Mostramos que os resultados para o expoente  $z$ , obtidos por seis maneiras diferentes, assim como os resultados recentes para o modelo de Ising com interações de três spins<sup>39</sup> (modelo que também pertence à mesma classe de universalidade do Potts-4) não confirmam os resultados obtidos por Santos e Figueiredo<sup>42</sup>. Já para o expoente  $\theta$ , os resultados revelam uma diferença marcante entre o modelo de Baxter-Wu e o de Ising com interação de três spins. Aparentemente, esse fato está relacionado com a ausência de um operador marginal no modelo de Baxter-Wu (operador marginal é aquele que tem a dimensão de escala igual à dimensionalidade do sistema e cujo efeito frente a uma operação do grupo de renormalização não é aumentado nem diminuído). Como se sabe, operadores desse tipo estão presentes nos modelos de Potts-4, oito-vértices e Ashkin-Teller e são responsáveis pela não universalidade característica daqueles casos.

Como pontos em aberto, merecedores de uma atenção futura, ressaltamos o estudo do parâmetro de ordem de Baxter<sup>82</sup> que consiste na variável produto das trincas, capaz de fornecer outras informações sobre o modelo. Sabe-se que o modelo de Baxter-Wu tem três operadores relevantes (um além da temperatura e do campo magnético)<sup>83</sup>. Até o momento não sabemos como sondar esse terceiro operador mas trabalhar com esse parâmetro de ordem pode ser um bom começo. Continua em falta uma explicação consistente para o valor negativo e grande do expoente crítico  $\theta$ , embora pareça razoável supor que ele seja decorrente da inexistência do operador marginal (que tem autovalor zero). O cálculo do expoente  $z$  por meio da propagação de dano<sup>78</sup> também representa um desafio que não parece insuperável. Finalmente, a inclusão da interação de dois corpos (tipo Ising) na Hamiltoniana ampliaria o espaço de parâmetros e permitiria um estudo mais abrangente dos pontos fixos, bacia de atração e efeitos de “crossover”.

Na segunda parte do trabalho, investigamos a propagação de danos em modelo de Ising unidimensional submetido a dois tipos de dinâmicas recentemente propostas por Hinrichsen e Domany (HD)<sup>43</sup>. No caso da primeira dinâmica, a existência de propagação decorre da semelhança entre as regras de evolução para o dano local, obtidas a partir do “update” dos spins, e as regras de evolução para o autômato de Domany-Kinzel<sup>44</sup>. Essa relação pode ser bem entendida no caso limite de temperatura infinita, conforme mostrado no trabalho original. Já para a segunda dinâmica, partindo de um mapeamento que produzimos, no caso limite de temperatura infinita e valor do parâmetro  $\lambda = 0$ , ficou claro que os expoentes teriam que ser da classe de universalidade PC (conservação de paridade) como consequência da semelhança entre o modelo de HD e o autômato celular (modelo A) de Grassberger<sup>45</sup>. Também pudemos verificar que com a primeira dinâmica a propagação ocorre independente da forma de atualização (síncrona ou assíncrona). Já para a segunda dinâmica, a forma sincronizada (tipo autômato) de atualização é a única que leva à propagação do dano.

A presença de transições pertencentes às classes de universalidade da percolação direcionada e de conservação de paridade em um modelo simples como esse abre a possibilidade de estimar o valor do expoente  $\theta$  de Huse para os dois casos. Esse é um ponto que merece ser explorado no futuro.

# Bibliografia

01. H. E. Stanley, *An Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena*  
Oxford University Press, Oxford, 1971.
02. A. Sornette e D. Sornette, *Geophys. Res. Lett.* 26, 1989 (1999).
03. D. Sornette e L. Knopoff, *B. Seismol. Soc. Am.* 87, 789 (1997).
04. P. Bak e K. Sneppen, *Phys. Rev. Lett.* 71, 4083 (1993).
05. P. Bak, *Nature* 391, 652 (1998).
06. D. Sornette, *Physica A* 284, 355 (2000).
07. P. Bak, S. F. Norrelykke, M. Shubik, *Phys. Rev. E* 60, 2528 (1999).
08. D. Sornette e Y. Malevergne, *Physica A* 299, 40 (2001).
09. N. Boccara, K.O. Cheong, M. Oram, *J. Phys. A* 27, 1585 (1994).
10. N. Boccara, K. Cheong, *J. Phys. A* 25, 2447 (1992).
11. N. A. Alves, U. H. E. Hansmann, *Physica A*, 292, 509 (2001).
12. N.A. Alves, U. H. E. Hansmann, *Phys. Rev. Lett.* 84, 1836 (2000).

- 
13. J. D. van der Waals. *Sobre a Continuidade do Estado Líquido e Gasoso*, tese de doutorado, Universidade de Leiden, 1873
  14. P. Weiss, *J. Phys. Radium*, Paris 6, 667, (1907).
  15. E. Ising, *Z. Phys.* 31, 253 (1925).
  16. L. Onsager, *Phys. Rev.* 65, 117, (1944).
  17. T. Tome e M. J. de Oliveira, *Dinâmica Estocástica e Irreversibilidade*, Edusp, São Paulo, 2001.
  18. C. N. Yang, e C. P. Yang, *Phys. Rev.* 147, 303 (1966).
  19. R.J. Baxter, *Exactly Solved Models in Statistical Mechanics* (Academic, New York, 1982).
  20. K.G. Wilson, e M. E. Fisher, *Phys. Rev. Lett.* 28, 248 (1972).
  21. S. K. Ma, *Modern theory of critical phenomena*, W.A. Benjamin, Inc. Advanced Book Program, Massachusetts, 1976.
  22. K.G. Wilson, e J. Kogut, *Phys. Reports C* 12, 75 (1974)
  23. A. Rahman, *Phys. Rev. A* 405, 136 (1964).
  24. J.J Erpenbeck, e W.W. Wood, Em *Statistical Mechanics*. (Berne, B. J., ed) Vol. 6b. p.1. Plenum Press, New York (1977).
  25. N. Metropolis, *et al* , *J. Chem. Phys.* 21, 1087, (1953).
  26. K. Binder, Em *Phase Transitions and Critical Phenomena*. (Domb, C. e Green, M. S., eds) Vol Vb p.1. Academic Press, New York, 1976.
  27. K. Binder, Em *Monte Carlo Methods in Statistical Physics I*. Springer-Verlag, Heidelberg, 1979.

- 
28. K. Binder, e D. W. Herrmann, *Monte Carlo Simulations in Statistical Physics* Springer, Berlin, 1992.
  29. R. J. Glauber, *J. Math. Phys.* 4 294 (1963).
  30. A. Ferrenberg, e R. Swendsen, *Phys. Rev. Lett.* 61 2635 (1998).
  31. J. M. Yeomans, *Statistical Mechanics of Phases Transitions*, Oxford Clarendon Press, 1992.
  32. R. H. Swendsen, e J. S. Wang, *Phys. Rev. Lett.* 58 86 (1987).
  33. B. A. Berg, e T. Neuhaus, *Phys. Lett. B* 267 249 (1991).
  34. H. K Janssen, B. Schaub, B. Schmittmann, *Z. Phys.* B73 539, (1989).
  35. D. A. Huse, *Phys. Rev. B* 40 304 (1989).
  36. R.J. Baxter, F.Y. Wu, *Phys. Rev. Lett.* 31, 1294 (1973).
  37. R.J. Baxter, F.Y. Wu, *Aust. J. Phys.* 27 357 (1974).
  38. F. Y. Wu, *Rev. Mod. Phys.* 54, 235, (1982).
  39. C. S. Simões e J.R. Drugowich de Felício, *Mod. Phys. Lett B* 15, 487 (2001).
  40. L. P. Kadanoff e A. C. Brown, *Ann. Phys.* 121, 318 (1979).
  41. F.C. Alcaraz, J.C. Xavier, *J. Phys. A* 30, L203 (1997).
  42. M. Santos e W. Figueiredo, *Phys. Rev. E* 63, 042101 (2001).
  43. H. Hinrichsen and E. Domany, *Phys. Review E* 56, 94(1997) .
  44. E. Domany e W. Kinzel, *Phys. Review Lett.* 53, 447 (1984).

- 
45. P. Grassberger *et al.*, *J. Phys. A: Math Gen.* 17 (1984).
  46. E. Arashiro, J.R. Drugowich de Felício, *Braz. J. Phys.*, 30, 677 (2000).
  47. L. P. Kadanoff e F. J. Wegner, *Phys. Rev. B* 4, 3989 (1971)
  48. M. E. Fisher, Em *Int. School of Physics "Enrico Fermi"* (Green, M. S., ed) Course LI P.1 Academic Press, London, 1971.
  49. M. P. Nightingalle, *Physica A* 83, 561 (1976).
  50. L. de Arcangelis, e N. Jan, *J. Phys. A* 19, L1179 (1986).
  51. T. Tome e M.J. de Oliveira, *Phys. Rev. E* 58, 4242 (1998).
  52. B. C. S. Grandi e W. Figueiredo, *Phys. Rev. E* 54, 4722 (1996).
  53. B. Zheng, *Int. J. Mod. Phys. B* 12, 1419 (1998).
  54. Z. B. Li, L. Schulke, B. Zheng, *Phys. Rev. Lett.* 74, 3396 (1995).
  55. J. F. F. Mendes e M.A. Santos, *Phys. Rev. E* 57, 108 (1998).
  56. D. W. Wood e H. P. Griffiths, *J. Phys. C* 5, L253 (1972).
  57. R.J. Baxter, *Aust. J. Phys.* 27, 369 (1974).
  58. D. Merlini , C. Gruber, *J. Math. Phys.* 13, 1814 (1972).
  59. D. P. Landau e K. Binder, *A Guide to Monte Carlo simulations in Statistical Physics*, Cambridge, 2000.
  60. R. B. Potts, *Proc. Cam. Phil. Soc.* 48, 106 (1952).
  61. R. Silva, N.A. Alves, J.R. Drugowich de Felício, submetido ao *Phys. Lett. A*.

- 
62. K. Binder, *Z. Phys. B* 43, 119 (1981).
  63. L. Wang, J.B. Zhang, H.P. Ying, D.R Ji, *Mod. Phys. Lett. B* 13, 1011 (1999).
  64. K. Okano, L. Schulke, K. Yamagishi e B. Zheng, *J. Phys. A: Math Gen.* 30, 4527 (1997).
  65. Z. B. Li, L. Schulke, *Phys. Rev. E* 53, 2940 (1996).
  66. M. S. Soares, J. K. L. Silva e F.C. Barreto, *Phys. Rev. B* 55, 1021 (1997).
  67. P.M.C. de Oliveira, *Europhys. Lett.* 20, 621 (1992).
  68. S. Kauffman, *J. Theor. Biol.* 22, 437 (1969).
  69. M. Creutz, *Ann. Phys.* 167, 62 (1986).
  70. H. Stanley, D. Stauffer, J. Kertesz e H. Herrmann, *Phys. Rev. Lett.* 59, 2326 (1987).
  71. U. M. S. Costa, *J. Phys. A* 20, L583 (1987).
  72. A. Coniglio, H. J. Herrmann, *et al.*, *Europhys. Lett.* 8, 315 (1989).
  73. M.L Martins, C. Tsallis, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 66, 2045 (1991).
  74. T. Tome, *Physica A* 212, 99 (1994).
  75. P. Grassberger, *J. Stat. Phys.* 79, 13 (1995).
  76. H. Hinrichsen, J. S. Weitz, E. Domany, *J. Stat Phys* 88, 617 (1997).
  77. P. Grassberger e A. de La Torre, *Ann. Phys.*, 122, 373 (1979).
  78. P. Grassberger, *Physica A* 214, 547 (1995).
  79. I. Jensen, *Phys. Rev. Lett.* 77, 4988 (1996).



80. S. Wolfram, *Cellular Automata and Complexity*, ed. Addison-Wesley, 1994.
81. G. Ódor and N. Menyhárd, *Phys Rev E* 57, 5 (1998).
82. R. Baxter, *J. Phys. A* 8, 1797 (1975).
83. M. N. Barber, *J. Phys. A* 9, L171 (1976).