

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

Alisson Rodrigo da Silva

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARALELA BASEADA EM AUTÔMATOS
CELULARES: Estudo de Caso em Simulação da Dinâmica de Nuvens**

Belo Horizonte
2015

Alisson Rodrigo da Silva

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARALELA BASEADA EM AUTÔMATOS
CELULARES: Estudo de Caso em Simulação da Dinâmica de Nuvens**

Dissertação apresentada ao programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Maury Meirelles Gouvêa Júnior.

Coorientador: Prof. Dr. Luís Fabrício Wanderley Góes.

Belo Horizonte

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

S586s

Silva, Alisson Rodrigo da

Simulação computacional paralela baseada em autômatos celulares: estudo de caso em simulação da dinâmica de nuvens / Alisson Rodrigo da Silva. Belo Horizonte, 2015.

109 f. : il.

Orientador: Maury Meirelles Gouvêa Júnior

Coorientador: Luís Fabrício Wanderley Góes

Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

1. Autômato celular. 2. Simulação (Computadores digitais). 3. Programação paralela (Computação). 4. Arquitetura de computador. 5. Métodos de simulação. 6. Nuvens. I. Gouvêa Júnior, Maury Meirelles. II. Góes, Luís Fabrício Wanderley. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 681.3.092

Alisson Rodrigo da Silva

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARALELA BASEADA EM AUTÔMATOS
CELULARES: Estudo de Caso em Simulação da Dinâmica de Nuvens**

Dissertação apresentada ao programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Dr. Maury Meirelles Gouvêa Júnior (Orientador) – PUC Minas

Dr. Luís Fabrício Wanderley Góes (Coorientador) – PUC Minas

Dr. Carlos Augusto Paiva da Silva Martins – PUC Minas

Dra. Adma Raia Silva – INFRAERO

Belo Horizonte, 03 de julho de 2015.

*A Deus
pelo dom da vida*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Jesus Cristo, (quem é digno de honra, glória, louvor e adoração e no qual a minha alma se alegra) por me permitir viver essa experiência e me sustentar em todo o tempo com saúde, amor e graça.

Agradeço aos meus pais Bonifácio e Marly pelo apoio e amor incondicional. É certo que eu não chegaria até aqui sem eles.

À minha esposa Bárbara Kelly Martins Rocha que sempre me apoiou, teve paciência e compreensão durante os momentos mais difíceis dessa caminhada. Eu te amo!

Agradeço à minha tia Marlene pelos conselhos e orações desde os tempos da graduação até hoje.

Aos meus irmãos Mardônio e Aline pela amizade e carinho.

Aos professores do PPGEE com quem eu pude absorver conhecimento científico e também desenvolver o convívio humano em grupo.

Ao professor Dr. Carlos Augusto Paiva da Silva Martins que me acompanha desde o primeiro dia no PPGEE e me ensinou ciência e humanidade.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Maury Meirelles Gouvêa Júnior e Prof. Dr. Luís Fabrício Wanderley Góes, pela dedicação, excelente orientação, pelas informações e conhecimentos transmitidos, os quais foram empregados nessa pesquisa e resultaram na realização e conclusão desse trabalho. Pessoas que para mim é um prazer conviver e fazer pesquisa!

Aos colegas e amigos de mestrado que tive o privilégio de conhecer e conviver e cujas críticas, sugestões, reflexões, e incentivos recebidos me ajudaram a concluir esse trabalho.

Ao Alyson Deives que contribuiu imensamente na implementação do código paralelo usando a biblioteca PSkel.

À Dra. Adma Raia Silva meteorologista da INFRAERO que participou contribuindo para a construção do modelo matemático utilizado nesse trabalho.

Aos membros do Grupo de Pesquisa de Modelagem, Otimização e Controle de Sistemas Complexos, em especial a Alloma Karoline Camargos Silva pela amizade e suas contribuições nesse projeto.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - por ter me concedido a bolsa de estudos.

“Se enxerguei mais longe, foi porque me apoiei sobre os ombros de gigantes.”
– Isaac Newton (1643-1727), físico e matemático inglês (NEWTON, 1959)

“A gravidade explica os movimentos dos planetas, mas não pode explicar quem colocou os planetas em movimento. DEUS governa todas as coisas e sabe tudo que é ou que pode ser feito.”
– Isaac Newton (1643-1727), físico e matemático inglês (TINER; BIEL, 1975)

RESUMO

A construção de modelos computacionais para simulação de sistemas reais permite analisar e entender sua dinâmica, além de prever a evolução futura desses sistemas. As simulações computacionais têm como vantagens a segurança, o menor custo e tempo despendido, pois pode-se criar sistemas que ainda não existem sem o custo da construção, com segurança, e em tempos menores que os reais. Porém, a simulação de sistemas complexos requer uma grande quantidade de cálculos, geralmente executadas em supercomputadores ou plataformas de computação distribuída com recursos de computação paralela. Os modelos atmosféricos são exemplos de sistemas complexos, pois são compostos por um grande número de variáveis, muitas equações diferenciais e evolução espaço-temporal. O autômato celular (AC) é um método numérico utilizado em simulações de sistemas representado por uma matriz de células onde as transições de estado dependem do estado das células vizinhas. Esse trabalho apresenta uma proposta de implementação paralela de AC de duas dimensões utilizando como estudo de caso um modelo atmosférico de dinâmica de nuvens. Foram utilizados como métodos de paralelização as APIs OpenMP, TBB e CUDA. Os testes foram realizados em uma arquitetura de memória compartilhada com microprocessador de 12 núcleos físicos e GPU com 192 *cores*. Foram realizados experimentos para avaliações de estabilidade, precisão e desempenho em uma área atmosférica isolada. Os primeiros experimentos avaliaram a estabilidade dinâmica do modelo sequencial. Um segundo conjunto de experimentos avaliou a precisão do modelo paralelo em relação ao modelo sequencial. Finalmente, os últimos experimentos verificaram o desempenho do modelo paralelo, em relação ao seu equivalente sequencial, utilizando como métricas o tempo de execução e o *speedup*. Os resultados mostraram um modelo paralelo estável do ponto de vista do equilíbrio térmico. Os testes de desempenho mostraram que o tempo de execução diminuiu à medida que o número de *threads* aumenta até o limite do número de núcleos físicos do microprocessador, atingindo um ganho de desempenho até 6,5 vezes melhor que a versão sequencial. Os resultados também abrem espaço para novos modelos utilizando a biblioteca MPI para implementação em *clusters*, com memória distribuída e arquitetura híbrida, e em um autômato celular 3D.

Palavras-chave: Autômatos Celulares. Simulação. Dinâmica de Nuvens. Modelos de Programação Paralela. Padrões de Programação Paralela.

ABSTRACT

The construction of computational models to simulate real systems enables their dynamics to be understood and analysed and the future evolution of these systems to be predicted. The benefits of using computational simulations are that they are more secure, save cost and time, since systems that do not already exist can be created without incurring the costs of building them, securely, and in less time than real ones. However, the simulation of complex systems needs a lot of calculations, usually run either in supercomputers or distributed computer platforms with parallel computing resources. Atmospheric models are examples of complex systems, since they consist of a large number of variables, many differential equations, and space-temporal evolution. A cellular automaton (CA) is a numerical method used in simulations of systems represented by a matrix of cells where the state transitions depend on the state of neighboring cells. This work sets out a proposal for the parallel implementation of two dimensional CA, using an atmospheric model of cloud dynamics as a case study. The parallelization methods used are OpenMP, TBB, and CUDA. The tests were performed in a shared memory architecture with a 12-core microprocessor and a 192-core GPU. Several experiments were performed in order to assess stability, precision, and performance in an isolated atmospheric area. The first experiments evaluated the dynamic stability of the sequential model. A second set of experiments evaluated the precision of the parallel model with respect to the sequential one. Finally, the last experiments evaluated the performance of the parallel model relative to the sequential one, using run time and speedup as metrics. The results showed that the parallel model is stable from the point of view of thermal equilibrium. The performance tests showed that the run time decreases as the number of *threads* increases until the limit of the number of microprocessor cores, reaching a performance gain of up to 6.5 times better than sequential version. The results also open up the possibility of creating new models using the MPI library that can be implemented in clusters, with a distributed memory and hybrid architecture, and in a 3D cellular automaton.

Keywords: Cellular Automata. Simulation. Cloud Dynamic. Parallel Programming Models. Parallel Programming Patterns.