



**Cristian Enrique Muñoz Villalobos**

**Paralelização Heterogênea da Programação Genética  
Linear com Inspiração Quântica**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Marco Aurélio Pacheco Cavalcanti  
Co-Orientador: Prof. Douglas Mota Dias

Rio de Janeiro  
Abril de 2014



**Cristian Enrique Muñoz Villalobos**

**Paralelização Heterogênea da Programação Genética  
Linear com Inspiração Quântica**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Marco Aurélio Pacheco Cavalcanti**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Prof. Douglas Mota Dias**

Co-orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Prof. Karla Tereza Figueiredo Leite**

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Prof. Noemi de la Roque Rodriguez**

Departamento de Informática - PUC-Rio

**Prof. Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco**

Departamento de Elétrica - PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de abril de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

**Cristian Enrique Muñoz Villalobos**

Formado em Engenharia Mecatrônica pela Universidad Nacional de Ingeniería – UNI, Lima, Peru (2005-2010).

Ficha Catalográfica

Villalobos, Cristian Enrique Muñoz

Paralelização heterogênea da programação genética linear com inspiração quântica / Cristian Enrique Muñoz Villalobos ; orientador: Marco Aurélio Pacheco Cavalcanti, co-orientador: Douglas Mota Dias.– 2014.

82 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2014.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Paralelização heterogênea. 3. Programação genética linear. 4. Algoritmos evolutivos com inspiração quântica. 5. Computação de alto desempenho. 6. Computação com GPU. 7. Visualização gráfica. I. Cavalcanti, Marco Aurélio Pacheco. II. Dias, Douglas Mota. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

## Agradecimentos

A Deus.

Ao meu orientador Professor Marco Aurélio, pelo apoio e parceria para a realização deste trabalho.

Ao meu coorientador Douglas, pela confiança, estímulo e importantes contribuições.

Aos meus pais, Luisa e José, pela educação, atenção e carinho.

Aos meus irmãos Jannet e Pepito, por todo apoio, paciência e compreensão.

À Frances Blank e Juan Lazo, amigos da PUC-Rio.

Aos Professores. Ricardo Rodríguez Bustinza e Elizabeth Villota Cerna, da Universidade Nacional de Engenharia, pelo apoio para começar meus estudos de pós-graduação na PUC-Rio.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam e me ajudaram.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

Ao CNPq, à PUC-Rio e à FAPERJ pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

## Resumo

Muñoz, Cristian Enrique Villalobos. Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti; Dias, Douglas Mota. **Paralelização Heterogênea da Programação Genética Linear com Inspiração Quântica**. Rio de Janeiro, 2014. 82p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dos principais desafios da ciência da computação é conseguir que um computador execute uma tarefa que precisa ser feita, sem dizer-lhe como fazê-la. A Programação Genética (PG) aborda este desafio a partir de uma declaração de alto nível sobre “o que é necessário ser feito” e cria um programa de computador para resolver o problema automaticamente. Nesta dissertação, é desenvolvida uma extensão do modelo de Programação Genética Linear com Inspiração Quântica (PGLIQ) com melhorias na eficiência e eficácia na busca de soluções. Para tal, primeiro o algoritmo é estruturado em um sistema de paralelização heterogênea visando à aceleração por Unidades de Processamento Gráfico e a execução em múltiplos processadores CPU, maximizando a velocidade dos processos, além de utilizar técnicas otimizadas para reduzir os tempos de transferências de dados. Segundo, utilizam-se as técnicas de Visualização Gráfica que interpretam a estrutura e os processos que o algoritmo evolui para entender o efeito da paralelização do modelo e o comportamento da PGLIQ. Na implementação da paralelização heterogênea, são utilizados os recursos de computação paralela como *Message Passing Interface* (MPI) e *Open Multi-Processing* (OpenMP), que são de vital importância quando se trabalha com multi-processos. Além de representar graficamente os parâmetros da PGLIQ, visualizando-se o comportamento ao longo das gerações, uma visualização 3D para casos de robótica evolutiva é apresentada, na qual as ferramentas de simulação dinâmica como *Bullet SDK* e o motor gráfico OGRE para a renderização são utilizadas.

## Palavras-chave

Paralelização heterogênea; programação genética linear; algoritmos evolutivos com inspiração quântica; computação de alto desempenho; computação com GPU; visualização gráfica.

## Abstract

Muñoz, Cristian Enrique Villalobos. Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti (Advisor); Dias, Douglas Mota (Co-Advisor). **Heterogeneous Parallelization of Quantum-Inspired Linear Genetic Programming**. Rio de Janeiro, 2014. 82p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

One of the main challenges of computer science is to get a computer execute a task that must be done, without telling it how to do it. Genetic Programming (GP) deals with this challenge from a high level statement of "what is needed to be done" and creates a computer program to solve the problem automatically. In this dissertation we developed an extension of Quantum-Inspired Linear Genetic Programming Model (QILGP), aiming to improve its efficiency and effectiveness in the search for solutions. For this, first the algorithm is structured in a Heterogeneous Parallelism System, Aiming to accelerated using Graphics Processing Units GPU and multiple CPU processors, reducing the timing of data transfers while maximizing the speed of the processes. Second, using the techniques of Graphic Visualization which interpret the structure and the processes that the algorithm evolves, understanding the behavior of QILGP. We used the high-performance features such as Message Passing Interface (MPI) and Open Multi-Processing (OpenMP), which are of vital importance when working with multi-processes, as it is necessary to design a topology that has multiple levels of parallelism to avoid delaying the process for transferring the data to a local computer where the visualization is projected. In addition to graphically represent the parameters of PGLIQ devising the behavior over generations, a 3D visualization for cases of evolutionary robotics is presented, in which the tools of "dynamic simulation" as Bullet SDK and graphics engine OGRE for rendering are used . This visualization is used as a tool for a case study in this dissertation.

## Keywords

Heterogeneous parallelization; linear genetic programming; quantum inspired evolutionary algorithms; high performance computing; GPU computing; graphic visualization.

## Sumário

1 . Introdução	12
1.1. Motivações	12
1.2. Objetivos	14
1.3. Descrição do Trabalho	15
1.4. Organização do Trabalho	16
2 . Fundamentação Teórica	18
2.1. Introdução	18
2.2. Computação Evolutiva	18
2.2.1. Programação Genética Linear	19
2.2.2. Demes	20
2.3. Programação Genética Linear com Inspiração Quântica (PGLIQ)	21
2.3.1. Plataforma	21
2.3.2. Representação	22
2.3.3. Indivíduo Clássico	22
2.3.4. Indivíduo Quântico	23
2.3.5. Programas Evoluídos	24
2.3.6. Avaliação de um Indivíduo Clássico	24
2.3.7. Operador Quântico	24
2.3.8. Estrutura e Funcionamento do Modelo	25
2.4. Computação de Alto Desempenho	28
2.4.1. Introdução: GPUs vs CPUs	28
2.4.2. Conceitos gerais de computação paralela	29
2.4.3. Modelos de programação paralela utilizada	32
2.4.4. Ferramentas de programação paralela utilizadas	32
2.4.5. Níveis de Paralelismo	37
2.4.6. Torque	39
2.5. Visualização Gráfica	40
2.5.1. Visualização de Dados Técnicos	40
2.5.2. Visualização em Computação Evolucionária	40

2.5.3. Robótica evolutiva	41
3 . Implementação do Sistema	44
3.1. Paralelização em CUDA (GPU-PGLIQ)	44
3.2. Paralelização com OpenMPI (GPU-PGLIQ)	46
3.3. Paralelização com OpenMP (GPU-PGLIQ)	48
3.3.1. Paralelização Híbrida MPI /OpenMP (GPU-PGLIQ)	49
3.4. Visualização Gráfica	53
3.4.1. Visualização do Melhor Indivíduo Quântico	54
3.4.2. Visualização da estrutura de Sub-rotinas	54
3.4.3. Simulação e Animação	54
3.5. Análise da PGLIQ	55
4 . Estudo de Casos	61
4.1. Configuração	61
4.2. Distância Euclidiana	62
4.2.1. Avaliação de Desempenho:	65
4.3. Chapéu Mexicano	66
4.3.1. Avaliação de Desempenho	68
4.4. Estudo de Caso: Robótica Evolutiva	69
4.4.1. Configuração	69
4.4.2. Evolução da caminhada do robô.	72
5 . Conclusões e Trabalhos Futuros	77
5.1. Conclusões	77
5.2. Trabalhos Futuros	78
6. Referências bibliográficas	79



## Lista de Figuras

Figura 1. Representação gráfica de métodos algorítmicos e relacionamentos .....	19
Figura 2. Representação típica de PG linear para programas. ....	20
Figura 3. Modelo de <i>demes</i> como anéis (à esquerda) e rede de vizinhança (à direita). ....	20
Figura 4. Cromossomo de um indivíduo clássico. ....	23
Figura 5. Diagrama descritivo básico do modelo PGLIQ. ....	26
Figura 6. Diagrama de fluxo da PGLIQ .....	27
Figura 7. Comparação de desempenho de GPUs vs CPU. Desempenho da GPU continua a aumentar a um ritmo muito rápido. ....	28
Figura 8. Arquiteturas de sistema de multiprocessadores. ....	30
Figura 9. Paralelização homogênea. ....	31
Figura 10. Paralelização heterogênea. ....	31
Figura 11. Aplicação conjunta CPU-GPU. ....	33
Figura 12. (a) Streaming Processors e (b) Streaming Multiprocessor .....	33
Figura 13. Modelo MPI. (a) Grupos MPI. (b) Comunicadores MPI. ....	35
Figura 14. Modelo Híbrido MPI + OpenMP. ....	36
Figura 15. Algoritmo de Programação Híbrida .....	37
Figura 16. Vários níveis de paralelismo. ....	38
Figura 17. Gerenciador de Tarefas Torque .....	39
Figura 18. Técnica <i>Embodied Evolution</i> .....	42
Figura 19. Ambiente Simulado .....	43
Figura 20. <i>Kernels</i> utilizados em cada geração pela GPU-PGLIQ .....	45
Figura 21. Porcentagem de tempo de processamento de cada <i>kernel</i> em uma geração da PGLIQ. ....	46
Figura 22. Estrutura da evolução com <i>demes</i> utilizando CUDA e OpenMPI .....	47
Figura 23. Topologia Multi-GPUs com memória compartilhada no <i>Host</i> . ....	48
Figura 24. Estrutura Base MPI/OpenMP .....	49
Figura 25. Agrupamentos dos nós dos <i>clusters</i> . ....	50

Figura 26. Topologia MPI para Algoritmo Evolutivos .....	53
Figura 27. Distribuição de probabilidades da PGLIQ .....	56
Figura 28. Estrutura nova etapa de <i>Reset</i> .....	57
Figura 29. Etapas de Reset. (a) <i>Reset</i> padrão. (b) reset proposto.....	58
Figura 30. Estrutura de sub-rotinas da PGLIQ .....	59
Figura 31. Gráfico evolutivo do estudo de caso “Distância Euclideana” em função do tempo médio de cada execução dos modelos.....	62
Figura 32. Variação em relação à aptidão AIMGP em porcentage”. .....	63
Figura 33. Comparação Gráfica de desempenhos obtidos pelos <i>demes</i> no estudo de caso “Distância Euclideana” .....	64
Figura 34. Gráfico evolutivo do estudo de caso “Chapéu Mexicano” em função do tempo médio de cada execução dos modelos.....	66
Figura 35. Variação em relação à aptidão AIMGP em porcentage. ....	67
Figura 36. Comparação Gráfica de desempenho obtido pelos <i>demes</i> no estudo de caso “Chapéu Mexicano”. .....	68
Figura 37. Robô Hexápode no ambiente de simulação BULLET .....	69
Figura 38. Paralelismo Heterogêneo da PGLIQ para evolução do Robô Hexápode. ....	71
Figura 39. Sistema de evolução do hexápode .....	72
Figura 40. Função Sigmóide .....	72
Figura 41. Gráfico evolutivo do estudo de caso “Robótica Evolutiva” em função do número médio de indivíduos avaliados por execução (caso 2). .....	73
Figura 42. Salto realizado pelo hexápode .....	73
Figura 43. Caminhar robô hexápode.....	75

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Exemplo de um conjunto de funções e seus <i>tokens</i> .....	23
Tabela 2. Configuração do modelo PGLIQ para os experimentos .....	61
Tabela 3. Comparação de média e desvio padrão das aptidões dos melhores indivíduos por geração para o estudo de caso “Distância Euclideana”. .....	63
Tabela 4. Comparação do número de acertos obtidos no estudo de caso “Distância Euclideana”. .....	64
Tabela 5. Comparação da análise com <i>demes</i> obtidos no estudo de caso “Distância Euclideana”. .....	64
Tabela 6. Comparação de Tempos para o caso de Estudo de Distância Euclidiana .....	65
Tabela 7. Comparação de média e desvio padrão das aptidões dos melhores indivíduos por geração para o estudo de caso “Chapéu Mexicano” e Variação em Relação.....	67
Tabela 8. Comparação do número de acertos obtidos no estudo de caso “Chapéu Mexicano”. .....	67
Tabela 9. Comparação de Tempos para o caso de Estudo de Chapéu Mexicano .....	68
Tabela 10. Tabela de Resultados de experimentos utilizando 24 CPUs. ....	74
Tabela 11. Resultados de experimentos utilizando o número máximo de CPUs (84).....	74