



Victor Andres Ayma Quirita

**Avaliação de Métodos de Otimização Aplicados no
Modelamento da Estrutura dos Vasos Sanguíneos**

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. Raul Queiroz Feitosa
Co-Orientador: Dr. Dário Augusto Borges Oliveira

Rio de Janeiro
Julho de 2013



Victor Andres Ayma Quirita

**Avaliação de Métodos de Otimização Aplicados no
Modelamento da Estrutura dos Vasos Sanguíneos**

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. Raul Queiroz Feitosa

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Dr. Dário Augusto Borges Oliveira

Co-Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Juan Guillermo Lazo Lazo

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Maria Luiza Fernandes Velloso

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Gilson Alexandre Ostwald Pedro da Costa

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de Julho de 2013

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

Victor Andres Ayma Quirita

Nasceu em Cusco, Peru, no ano 1986. No 2008 se gradou na Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco na especialidade de Engenharia Eletrônica com ênfases em Telecomunicações. Atualmente esta fazendo o mestrado no programa de Engenharia Elétrica da PUC-Rio na área de Processamento de Sinais e Controle. Suas principais áreas de interesse são o processamento digital de imagens, visão computacional e telecomunicações.

Ficha Catalográfica

Ayma Quirita, Victor Andres

Avaliação de métodos de otimização aplicados no modelamento da estrutura dos vasos sanguíneos / Victor Andres Ayma Quirita; orientador: Raul Queiroz Feitosa ; co-orientador: Dário Augusto Borges Oliveira. – 2013.

78 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Vasos sanguíneos. 3. Imagens médicas. 4. Segmentação. 5. Métodos de otimização. 6. Tomografia computadorizada. I. Feitosa, Raul Queiroz. II. Oliveira, Dário Augusto Borges. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

A Deus,
por me permitir despertar cada dia e olhar sua grandeza.

A meus pais, Victor e Rina,
pelo seu exemplo, apoio e amor incondicional.

A meus irmãos, Hugo, Paola e Isarina,
por estar sempre para mim.

A Maybee,
amiga, companheira, amor de minha vida,
teu coração foi a motivação de todos meus dias.

Agradecimentos

Ao meu orientador Raul Queiroz Feitosa, pela oportunidade, compreensão, apoio, motivação, orientação e amizade, dentro e fora do âmbito acadêmico.

A Dário Oliveira, por todo seu apoio, tempo, colaboração, orientação, paciência e amizade. Sem sua ajuda e comentários não poderia ter sido realizada esta pesquisa.

À PUC-Rio e aos seus professores do Departamento de Engenharia Elétrica.

Ao CNPq pelos auxílios concedidos.

A meu irmão Hugo, por seus comentários, ideias e observações que me ajudaram a realizar grande parte deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas da PUC-Rio, pela amizade, apoio e alegrias.

Resumo

Quirita, Victor Andres Ayma; Feitosa, Raul Queiroz (Orientador); Oliveira, Dário Augusto Borges (Co-Orientador). **Avaliação de Métodos de Otimização Aplicados no Modelamento da Estrutura dos Vasos Sanguíneos**. Rio de Janeiro, 2013. 78p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Segundo relatórios da Organização Mundial da Saúde, as doenças cardiovasculares são a principal causa de óbitos em nível mundial. Podem, porém, ser controladas mediante diagnóstico e tratamento adequados. Nesse contexto, as ferramentas tecnológicas de auxílio ao diagnóstico são importantes para redução do número de óbitos causados por este tipo de doenças. Esta dissertação avalia aos métodos de otimização: Differential Evolution, Generalized Pattern Search, Mesh Adaptive Direct Search e Nelder-Mead Algorithm, aplicados na busca dos parâmetros que modelam a estrutura dos vasos sanguíneos a fim de melhorar os resultados e tempo de processamento da segmentação da árvore vascular em imagens médicas, conforme proposto em (Oliveira, 2013). Neste trabalho, são apresentados conceitos anatômicos e as características das imagens usadas neste estudo. São ainda descritos os métodos de otimização avaliados e a metodologia da segmentação da árvore vascular cujos parâmetros se deseja otimizar. Com essa base, se formula a metodologia de avaliação destes métodos através de uma análise quantitativa, que é produto da formulação de um teste de hipóteses da diferença entre a avaliação média em combinação pareada. Este teste avalia o desempenho dos métodos de otimização quando são aplicados em amostras aleatoriamente escolhidas em cada um dos exames de tomografia computadorizada que pertencem ao banco de dados composto por imagens: sintéticas, coronárias, hepáticas e de fibras nervosas do sistema olfativo. Conforme aos resultados do teste de hipótese, o método de otimização com o melhor desempenho, em acurácia e custo computacional, é escolhido e as conclusões deste trabalho são elaboradas assim como também as propostas de trabalhos futuros nesta mesma linha de pesquisa.

Palavras-chave

Vasos sanguíneos; Imagens Médicas; Segmentação; Métodos de Otimização; Tomografia Computadorizada.

Abstract

Quirita, Victor Andres Ayma; Feitosa, Raul Queiroz (Advisor); Oliveira, Dário Augusto Borges (Co-advisor). **Assessment of Optimization Methods applied in Modeling the Structure of Blood Vessels**. Rio de Janeiro, 2013. 78p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

According to the World Health Organization reports, cardiovascular diseases are the worldwide leading cause of death. However, they can be controlled using proper diagnosis tools and treatments. In this way, the diagnosis assisted technological tools are important to reduce the number of deaths caused by this type of diseases. This dissertation assess optimization methods (Differential Evolution, Generalized Pattern Search, Mesh Adaptive Direct Search, Nelder-Mead Algorithm) applied in the search of parameters that model blood vessels structures in order to improve the results and processing time of a vascular tree segmentation method in medical images, as proposed in (Oliveira, 2013). In this work, anatomical concepts and the characteristics of the images used in this study are presented. The optimization methods assessed and the methodology for the segmentation of the vascular tree, whose parameters are to be optimized, are described. Based on that, the procedure to assess different optimization methods is formulated through a quantitative analysis using a hypothesis test formulation of difference between paired means. This test evaluates the performance of the optimization methods using randomly chosen samples in a computerized tomography exams database composed by synthetic, coronary, hepatic and nervous fiber of the olfactory system images. According to the hypothesis test results, the optimization method with the best performance, both in accuracy and computational cost, is selected and the conclusions of this work are elaborated as well as the proposals for further research.

Keywords

Blood vessels; Medical Images; Segmentation; Optimization Methods; Computerized Tomography.

Sumário

1 Introdução	15
1.1. Motivação	17
1.2. Objetivos	17
1.3. Estrutura da Dissertação	18
2 Vasos Sanguíneos e sua Representação em Imagens Médicas de Tomografia Computadorizada	19
2.1. Vasos Sanguíneos	19
2.2. Tomografia Computadorizada (CT)	21
2.3. Imagens Digitais	24
2.4. Padrão DICOM	24
3 Segmentação da Árvore Vascular	26
3.1. Introdução	26
3.2. Modelo da Amostragem Cônica	27
3.3. Detecção de Ponto do Vaso Sanguíneo	28
3.3.1. Cálculo da Vascularidade	29
3.3.2. Seleção do Ponto Candidato de Vaso	31
3.4. Rastreamento da Rede Vascular	32
3.4.1. Detecção da Rede Vascular	32
3.4.2. Validação da Rede Vascular	33
3.5. Definição das Novas Sementes	34
3.6. Contextualização do Trabalho	34
4 Fundamentos Teóricos	35
4.1. Otimização Matemática	35
4.1.1. Problema de Otimização Matemática	35
4.1.2. Tipos de Problemas de Otimização	36
4.1.3. Otimalidade	37
4.2. Evolução Diferencial	38
4.2.1. Descrição do Método	39
4.2.2. Mutação	39

4.2.3. Cruzamento	40
4.2.4. Seleção	41
4.3. Busca Generalizada de Padrões	41
4.3.1. Fundamentos e Terminologia	42
4.3.2. Etapa SEARCH	45
4.3.3. Etapa POLL	46
4.4. Busca Direta de Malha Adaptativa	47
4.4.1. Etapa <i>POLL</i> no <i>MADS</i>	48
4.5. Algoritmo Nelder – Mead	51
4.5.1. Início do Simplex	52
4.5.2. Reflexão do Simplex	53
4.5.3. Expansão do Simplex	53
4.5.4. Contração do Simplex	54
4.5.5. Redução do Simplex	54
5 Metodologia para a Aplicação dos Métodos de Otimização	56
5.1. Função Objetivo	56
5.2. Implementação dos Métodos de Otimização	57
5.3. Principais Parâmetros do Funcionamento dos Protótipos	58
5.4. Banco de Imagens	59
5.5. Procedimento Experimental	62
6 Avaliação Experimental	65
6.1. Avaliação Quantitativa	65
6.2. Avaliação Visual	70
7 Conclusões	73
7.1. Discussão	73
7.2. Trabalhos Futuros	74
7.3. Considerações Finais	74
Referências Bibliográficas	76

Lista de figuras

Figura 1. Sistema Cardiovascular.	20
Figura 2. Estrutura comparativa dos vasos sanguíneos (Tortora, 2007).	21
Figura 3. Exemplo de uma imagem de CT da região abdominal (de esquerda para direita, e de cima para baixo: vistas axial, coronal e sagital).	22
Figura 4. Representação dos vasos sanguíneos em imagens de CT.	23
Figura 5. CT exame representado como uma imagem 3D.	25
Figura 6. Grafo construído usando as direções locais da rede vascular (Oliveira, 2013).	26
Figura 7. Diagrama de fluxo do método para segmentar as redes vasculares (Oliveira, 2013).	27
Figura 8. Modelo de amostragem cônico (Oliveira, 2013).	28
Figura 9. Etapas do modelo para o cálculo da vascularidade (Oliveira, 2013).	29
Figura 10. Seleção dos pontos amostrados (Oliveira, 2013).	32
Figura 11. Rastreamento de redes vasculares no grafo com a detecção dos vasos nos seus nós (Oliveira, 2013).	32
Figura 12. Regras do post-processamento estabelecem algumas restrições anatômicas para a rede vascular (Oliveira, 2013).	33
Figura 13. Definição de novas sementes (Oliveira, 2013).	34
Figura 14. Mínimo Global e Local de $f(x)$	37
Figura 15. Linhas de contorno de uma <i>função objetivo</i> bidimensional, e o processo de mutação para gerar $v_{i,G+1}$, (Storn & Price, 1997).	40
Figura 16. Processo de cruzamento para $n = 7$ parâmetros, (Storn & Price, 1997).	41
Figura 17. <i>Pontos de prova</i> ao redor de x_k (Abramsom, et al., 2003).	43
Figura 18. Estrutura geral do método <i>GPS</i> (MathWorks, 2012).	44
Figura 19. Pontos gerados no algoritmo <i>UD</i> para o caso bidimensional.	46
Figura 20. <i>GPS</i> : Exemplo de <i>pontos de prova</i> $P_k = \{x_k \pm \Delta_k^m e_j: e_j \in E\} = \{p1, p2, p3\}$ para diferentes valores de $\Delta_k^m = \Delta_k^p$ (Audet & Dennis, 2006).	49

Figura 21. <i>MADS</i> : Exemplo de <i>pontos de prova</i> $P_k = \{x_k \pm \Delta_k^m dj: dj \in D\} = \{p1, p2, p3\}$ para diferentes valores de Δ_k^m e Δ_k^p (Audet & Dennis, 2006).	49
Figura 22. Descrição do algoritmo Nelder – Mead (Luersen, et al., 2004).	51
Figura 23. Processo de reflexão para <i>Pr</i> (Mathews & Fink, 2004).	53
Figura 24. Processo de expansão para <i>Pe</i> (Mathews & Fink, 2004).	53
Figura 25. Processo de contração para <i>Pc</i> (Mathews & Fink, 2004).	54
Figura 26. Processo de redução em direção de <i>Pl</i> (Mathews & Fink, 2004).	54
Figura 27. (a) Vista sagital de um vaso no exame Synthetic1, (b) Representação aproximada do seu modelo 3D.	60
Figura 28. (a) Vista sagital de um vaso no exame Synthetic2, (b) Representação aproximada do seu modelo 3D.	60
Figura 29. (a) Vista coronal de um vaso no exame Synthetic3, (b) Representação aproximada do seu modelo 3D.	60
Figura 30. (a) Vista axial de um vaso no exame OPF1, (b) Representação aproximada do seu modelo 3D.	61
Figura 31. (a) Vista axial de um vaso no exame OPF3, (b) Representação aproximada do seu modelo 3D.	61
Figura 32. (a) Vista axial de um vaso no exame OPF7, (b) Representação aproximada do seu modelo 3D.	61
Figura 33. Em vermelho, escolha aleatória de alguns dos 50 pontos identificados como pertencentes ao vaso no exame de CT.	62
Figura 34. Aplicação do método <i>DE</i> (esquerda) e <i>NM</i> (direita) no exame Synthetic1.	71
Figura 35. Aplicação do método <i>DE</i> (esquerda) e <i>NM</i> (direita) no exame Synthetic2.	71
Figura 36. Aplicação do método <i>DE</i> (esquerda) e <i>NM</i> (direita) no exame Synthetic3.	71
Figura 37. Aplicação do método <i>DE</i> (esquerda) e <i>NM</i> (direita) no exame OPF1.	72
Figura 38. Aplicação do método <i>DE</i> (esquerda) e <i>NM</i> (direita) no exame OPF3.	72
Figura 39. Aplicação do método <i>DE</i> (esquerda) e <i>NM</i> (direita) no exame OPF7.	72

Lista de tabelas

Tabela 1. Decisões lógicas para o algoritmo NM (Mathews & Fink, 2004).	52
Tabela 2. Características dos métodos de otimização implementados.	57
Tabela 3. Parâmetros de configuração dos algoritmos de otimização.	58
Tabela 4. Banco de Imagens de CT preparado na pesquisa.	59
Tabela 5. Parte da base de dados com a vascularidade de 20 pontos na imagem Synthetic1.	63
Tabela 6. Valores do <i>Pvalue</i> para o teste de hipótese.	66
Tabela 7. Valor dos <i>CI</i> nos testes de hipótese realizados.	67
Tabela 8. Número de execuções dos métodos estudados.	69

Lista de Símbolos e Abreviações

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
CT	Computed Tomography
DE	Differential Evolution
DICOM	Digital Imaging Communications in Medicine
DS	Direct Search
GPS	Generalized Pattern Search
MADS	Mesh Adaptive Direct Search
NM	Nelder – Mead
OMS	Organização Mundial da Saúde
OPS	Organização Pan-Americana da Saúde
WHO	World Health Organization
UD	Uniform Distribution

O Senhor é o meu pastor e nada me faltará. Deita-me em verdes pastos e guia-me mansamente em águas tranqüilas. Refrigera a minha alma, guia-me pelas veredas da justiça, por amor do seu nome. Ainda que eu ande pelo vale da sombra da morte, não temerei mal algum, porque Tu estás comigo; a Tua vara e o Teu cajado me consolam. Prepara-me uma mesa perante os meus inimigos, unges a minha cabeça com óleo, o meu cálice transborda. Certamente que a bondade e a misericórdia me seguirão todos os dias da minha vida e habitarei na casa do SENHOR por longos dias.

Bíblia, Salmos, 23 (Salmo de Davi).