

3 Segmentação da Árvore Vascular

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos necessários para o entendimento do trabalho proposto; é apresentada uma descrição da metodologia de segmentação de árvore vascular utilizada neste trabalho, a fim de descrever a metodologia de segmentação para situar claramente a etapa em que se insere esta dissertação.

3.1. Introdução

Esta seção apresenta, de maneira breve, a metodologia proposta por Oliveira (Oliveira, 2013) na sua tese de doutorado para o rastreamento de uma rede vascular a partir de um único ponto de partida.

O método propõe o uso da teoria de grafos dirigidos para a elaboração de uma metodologia de segmentação das redes vasculares. A modelagem determina a construção de vários grafos locais interconectados e gerados de acordo com a direção dos vasos sanguíneos em determinados pontos pertencentes a vasos, como mostrado na Figura 6.

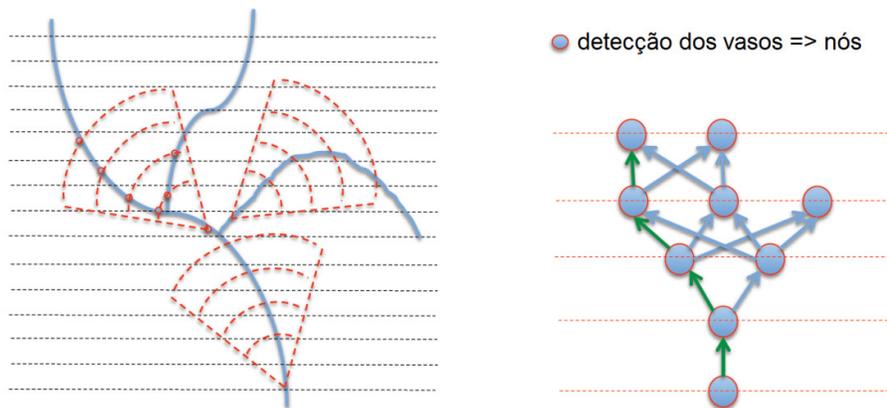


Figura 6. Grafo construído usando as direções locais da rede vascular (Oliveira, 2013).

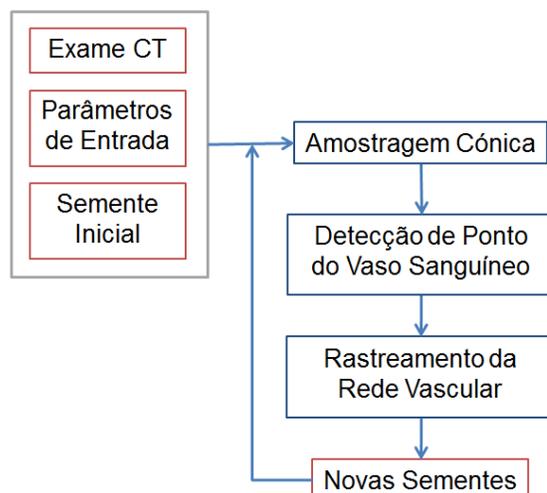


Figura 7. Diagrama de fluxo do método para segmentar as redes vasculares (Oliveira, 2013).

O método proposto segue um processo iterativo como ilustrado na Figura 7, e de maneira formal, o algoritmo é definido como a seguir:

1. Definição do exame de CT de entrada, os parâmetros e a semente (ponto) inicial.
2. Amostragem cônica a partir de um determinado ponto.
3. Detecção dos pontos que são vasos entre os pontos amostrados.
4. Rastreamento da rede vascular com os pontos detectados como vasos.
5. Definição de novas sementes a partir da estrutura vascular detectada.
6. Repetir os passos 2 ao 5 até que não haja mais sementes para analisar.

A seguir serão descritas as partes principais do algoritmo a fim de poder descrever a etapa na qual a proposta da presente dissertação está inserida.

3.2. Modelo da Amostragem Cônica

O método de amostragem segue um modelo cônico composto por várias camadas esféricas concêntricas, como apresentado na Figura 8. As características que este modelo apresenta são:

1. Os pontos dentro de uma mesma camada são equidistantes à origem. Procura-se modelar uma equiprobabilidade de que estes pontos pertençam ao mesmo vaso representado na origem, ao menos no que diz respeito à posição espacial.

2. O tamanho da área das camadas é incrementado proporcionalmente a sua distância à origem, considerando que o vaso possui maior potencial de espalhamento com o aumento da distância observada.
3. O ângulo de abertura (α), o tamanho do eixo (R), a distância de amostragem (s) e o vetor de direção (D) definem o modelo geométrico proposto para a amostragem dos pontos.
4. O número de camadas (N), o número de círculos concêntricos (M) em cada camada, e o número de pontos (L) em cada círculo, é calculado respeitando-se a distância de amostragem definida. Assim, camadas mais afastadas da origem têm maior quantidade de círculos; e círculos maiores têm maior quantidade de pontos neles definidos. Estes parâmetros são calculados em função à direção D' .

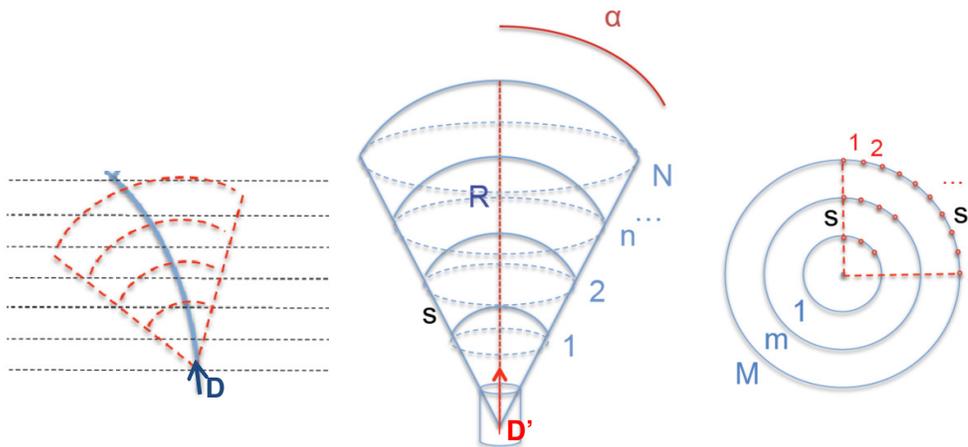


Figura 8. Modelo de amostragem cônico (Oliveira, 2013).

Uma nuvem de pontos é criada de acordo com o modelo geométrico proposto, onde os pontos são definidos nos círculos em cada camada do modelo cônico. Cada um destes pontos é avaliado como candidato de pertencer a um vaso e a métrica utilizada neste fim se denomina *vascularidade* e é descrita na seção 3.3.1. Desta avaliação são escolhidos os pontos que satisfaçam as características descritas na seção 3.3.2, sendo depois estruturados num grafo a partir do qual se detecta a rede vascular.

3.3. Detecção de Ponto do Vaso Sanguíneo

Após a nuvem de pontos do modelo cônico ser definida, cada ponto candidato é avaliado por uma métrica de vascularidade para depois ser definido como pertencente ou não a um vaso.

3.3.1. Cálculo da Vascularidade

A avaliação da semelhança entre um ponto candidato e um vaso sanguíneo é realizada através do cálculo da vascularidade.

Na literatura há diferentes abordagens que permitem realizar o cálculo da vascularidade, como por exemplo: modelos elípticos de seção cruzada (Florin, et al., 2005), modelos esféricos (Rossignac, et al., 2007) ou modelos padrão (Friman, et al., 2010; Wörz & Rohr, 2007). Nesta etapa do método de segmentação de árvores vasculares, o modelo proposto usa dois cilindros concêntricos, supondo que o vaso e o volume na sua vizinhança formam localmente uma mistura de gaussianas bifásica.

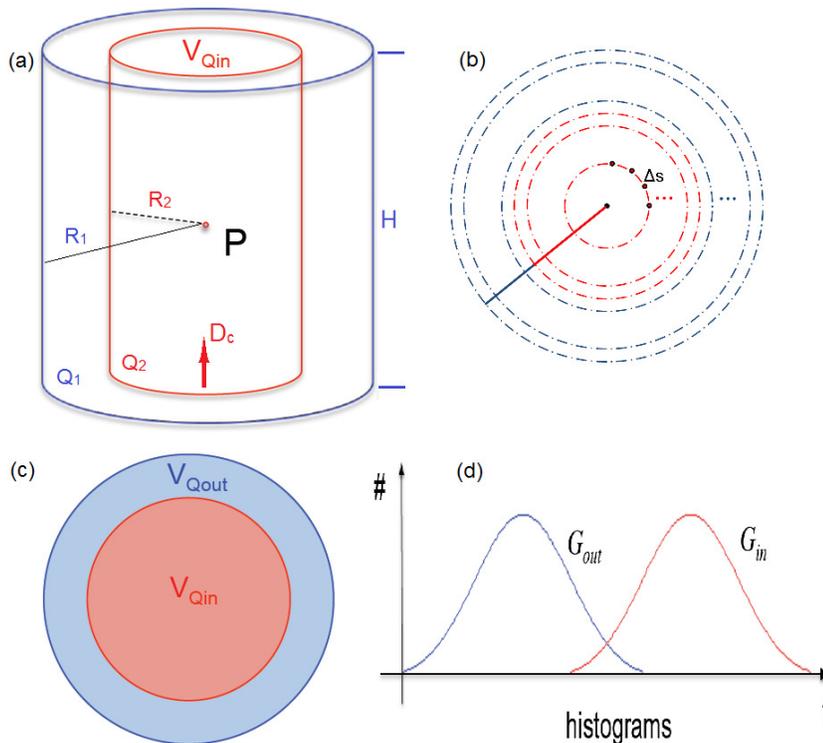


Figura 9. Etapas do modelo para o cálculo da vascularidade (Oliveira, 2013).

O modelo geométrico proposto para avaliação de vascularidade em determinado ponto é representado na Figura 9. Seja um ponto amostral P . Definem-se dois cilindros concêntricos com direção D_c , com o raio do cilindro interno R_2 , e com o raio do cilindro externo R_1 . Supõe-se que estes cilindros delimitam duas regiões diferentes, o cilindro interno uma região de vaso, e a parte exterior ao cilindro interno e delimitada pelo cilindro externo, uma região de

não vaso. Desta forma espera-se encontrar o conjunto de parâmetros (raio e direção), que melhor modele um vaso no ponto P , supondo-se uma mistura de gaussianas bifásica entre estas duas regiões.

A determinação do valor ótimo dos parâmetros que modelam os cilindros concêntricos se baseia num processo iterativo. As etapas que permitem determinar a semelhança de um ponto candidato da amostragem cônica ao vaso sanguíneo são as seguintes:

- Primeiro são definidos os valores dos parâmetros R_2 e D_c que modelam ao cilindro no ponto de análise P . R_2 é um escalar positivo e D_c é um vetor definido por dois ângulos: θ e φ . Os valores do raio R_1 e da altura H dos cilindros são proporcionais ao raio R_2 , conforme as Equações 3-3 e 3-4.

$$D_c = [D_{cx}, D_{cy}, D_{cz}] \quad (3-1)$$

$$D_c = \begin{bmatrix} \sin \varphi \cdot \cos \theta \\ \sin \varphi \cdot \sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix}, \quad \forall 0 \leq \theta \leq 2\pi \wedge 0 \leq \varphi \leq \pi/2 \quad (3-2)$$

$$R_1 = \lambda_1 * R_2, \quad \lambda_1 > 1 \quad (3-3)$$

$$H = \lambda_2 * R_2, \quad \lambda_2 > 1 \quad (3-4)$$

- Os cilindros, interno e externo, são compostos por múltiplas camadas de círculos concêntricos desde sua base, estes círculos são formados por uma série de pontos distribuídos ao longo do seu contorno (Figura 9b).
- Os pontos que formam os cilindros concêntricos são rotacionados na direção do cilindro D_c e são transladados para as coordenadas do ponto candidato da amostragem cônica P . Já nestas coordenadas, estes pontos representam aos voxels t situados no interior dos cilindros concêntricos.
- Define-se a Q_2 e Q_1 como os dois cilindros concêntricos, interno e externo respectivamente, mostrados na Figura 9a, define-se também a $V_{Q_{in}}$, que representa às intensidades dos voxels t situados dentro de Q_2 ; e a $V_{Q_{out}}$, que representa às intensidades dos voxels t situados fora do cilindro Q_2 mas que pertencem a Q_1 , como mostrado na Figura 9c.
- Define-se a G_{in} como a representação da distribuição Gaussiana estimada a partir de $V_{Q_{in}}$, e o mesmo para G_{out} com $V_{Q_{out}}$ (ver Figura 9d).
- Se o cilindro Q_2 definido por R_2 e D_c modela adequadamente à estrutura do vaso sanguíneo no ponto P , então a interseção das distribuições Gaussianas G_{in} e G_{out} será quase nula.

- A métrica da vascularidade é definida como:

$$V_m = \frac{\sum_{t \in V_{Q_{in}}} G_{out}(t) + \sum_{t \in V_{Q_{out}}} G_{in}(t)}{t_{Q_2}} \quad (3-5)$$

Na Equação 3-5, o termo $\sum_{t \in V_{Q_{in}}} G_{out}(t)$ representa quanto da intensidade dos t voxels do volume do cilindro interior ($V_{Q_{in}}$) não estão dentro da distribuição gaussiana do volume do cilindro exterior (G_{out}), e vice-versa para o segundo termo, ou seja, quão exclusiva é cada uma das duas distribuições gaussianas com respeito à outra. Assim, valores de V_m próximos a zero representariam pontos que são bons candidatos a pertencerem a um vaso.

Como pode ser observado, os valores dos parâmetros R_2 e D_c devem ser otimizados de maneira a modelar um possível vaso num determinado ponto de análise P através da minimização do valor da vascularidade. É justamente neste ponto que este trabalho de mestrado se insere, ao analisar diferentes métodos de otimização que permitam encontrar os parâmetros ótimos que melhor caracterizem o vaso e com o menor custo computacional associado a esta tarefa.

3.3.2. Seleção do Ponto Candidato de Vaso

A seleção do ponto como pertencente a um vaso é realizada em dois passos:

1. Aqueles pontos cujo valor de intensidade é bem diferente daquele observado no ponto semente da sua amostragem cônica são rejeitados e seus parâmetros não chegam a ser otimizados.
2. A cada ponto restante do passo anterior é aplicado o ajuste de parâmetros descrito na seção anterior (para R_2 e D_c) utilizando-se um método de otimização. O cilindro obtido pelo processo de otimização é validado mediante as seguintes regras:
 - A intensidade média dos voxels do cilindro interior deve ser maior do que a intensidade média dos voxels do volume exterior.
 - A vascularidade do ponto avaliado deve ser maior que uma fração da vascularidade na origem do cone. Esta proporção é um parâmetro definido pelo usuário e atua como um fator de sensibilidade que permite encontrar vasos com intensidades mais fracas ou mais fortes.

- Os pontos de vaso que têm o raio do seu cilindro demasiado pequeno são descartados.

Com estes critérios para a detecção dos pontos de vaso se prossegue a construir um grafo para identificar as cadeias de nós que formam a rede vascular; este grafo está baseado nos pontos candidatos de vaso seleccionados e no valor da sua vascularidade neles, conforme mostrado na Figura 10.

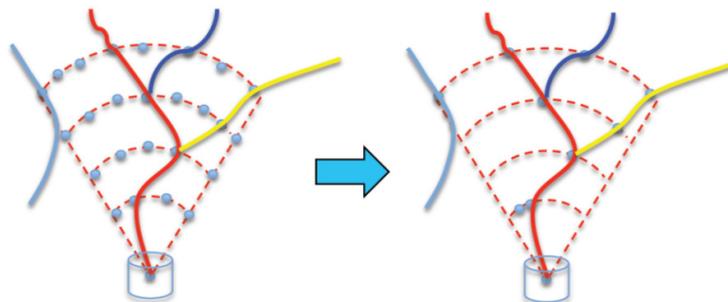


Figura 10. Seleção dos pontos amostrados (Oliveira, 2013).

3.4. Rastreamento da Rede Vasculuar

O rastreamento da rede vascular é modelado como um problema de fluxo de rede de custo mínimo. Este procedimento é realizado em duas etapas a seguir descritas.

3.4.1. Detecção da Rede Vasculuar

O objetivo é construir um grafo no qual os nós representem os vasos detectados de uma possível rede vascular (Figura 11), e onde o problema de correspondência, entre o grafo e a rede vascular, é equivalente a um problema de fluxo de rede de custo mínimo.

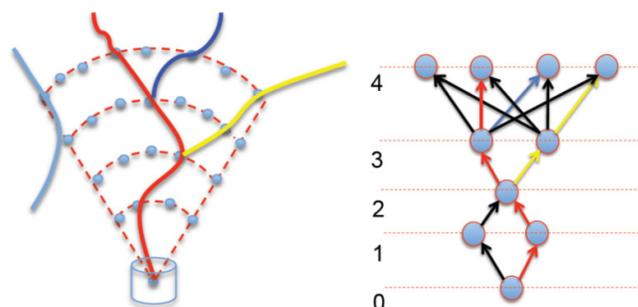


Figura 11. Rastreamento de redes vasculares no grafo com a detecção dos vasos nos seus nós (Oliveira, 2013).

A solução do problema do fluxo com o custo mínimo é realizada utilizando-se programação linear. Formalmente, a programação linear é uma técnica de otimização para uma função objetivo de tipo linear, sujeita a igualdades e desigualdades lineares (Dantzig, 1963). A função objetivo para a detecção da rede vascular é definida pela minimização do fluxo que percorre do grafo dirigido, construído como descrito na seção de amostragem.

3.4.2. Validação da Rede Vascular

Uma vez que o caminho conectado da rede vascular com o menor custo do fluxo associado no grafo é definido, é preciso realizar um procedimento de validação que assegure que o resultado final este de acordo com as regras básicas da anatomia vascular. Estas regras estão representadas na Figura 12 e são as seguintes:

- As ramificações do vaso não devem estar muito próximas uma da outra para que se evitem ramificações que representem o mesmo vaso.
- As ramificações do vaso não devem se reconectar a uma rede vascular já segmentada, para evitar a presença de laços, os quais não ocorrem com frequência em redes vasculares.

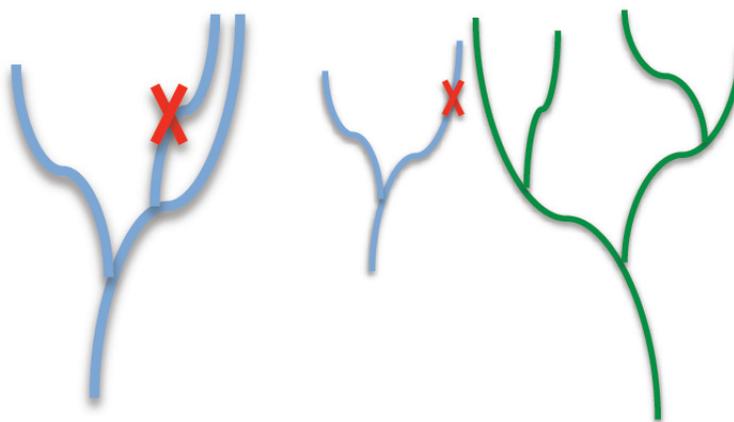


Figura 12. Regras do post-processamento estabelecem algumas restrições anatômicas para a rede vascular (Oliveira, 2013).

3.5. Definição das Novas Sementes

Cada nova ramificação, encontrada e validada, fornece uma nova semente para continuar com o processo iterativo da detecção da rede vascular. Assim, o ponto com a melhor avaliação da sua vascularidade no último 30% de cada ramificação encontrada define a uma nova semente, como mostrado na Figura 13.

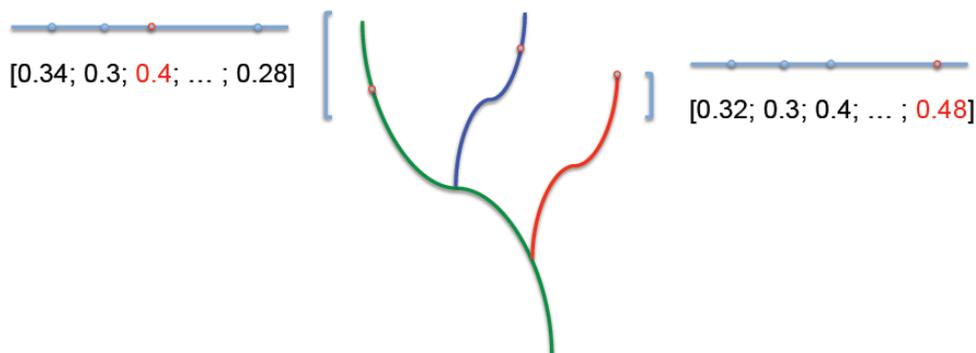


Figura 13. Definição de novas sementes (Oliveira, 2013).

Cada nova semente definida começa um novo processo de segmentação, desde a definição do modelo cônico de pontos candidatos até a definição de novas sementes, e este processo é repetido até que não se encontre mais sementes.

3.6. Contextualização do Trabalho

O foco principal deste trabalho está centrado na implementação e avaliação de diferentes métodos de otimização que serão utilizados no cálculo da vascularidade. Esta etapa é uma parte importante da metodologia desenvolvida por Dário Oliveira (Oliveira, 2013) para a segmentação de árvore vascular e explicada na seção 3.3.1 neste capítulo.

O objetivo é encontrar ao método que defina os parâmetros R_2 e D_c que melhor caracterizem os cilindros concêntricos que modelam a estrutura tridimensional do vaso sanguíneo num determinado ponto de análise, ver Figura 9. O modelo é melhor enquanto o valor da sua vascularidade seja o mais próximo a zero, define-se assim um problema de otimização para a minimização da vascularidade.