

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E BIOLÓGICAS  
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

CAMILA APARECIDA SILVA OLIVEIRA  
EDUARDO GORDIANO PASSOS SILVA  
LOURRANE LINDSAY ALVES EVARISTO  
MARIA CLARA SILVA PERPETUO  
NIEGE MARRYANY DOS REIS DA SILVA

**RELATÓRIO TÉCNICO: TRABALHO PRÁTICO 2**

**Visualização Interativa e Realista de Árvores Arteriais 3D Geradas pelo Método CCO**

**Disciplina: BCC 327 - Computação Gráfica**

OURO PRETO  
2026

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Pipeline de renderização 3D implementado.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Entrada de dados (Input / Aquisição):.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Modelagem geométrica:.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3. Sistema de coordenadas e transformações:.....</b>	<b>4</b>
<b>2.4. Projeções (3D → 2D):.....</b>	<b>5</b>
<b>2.5. Iluminação e sombreado:.....</b>	<b>5</b>
<b>2.6. Rasterização:.....</b>	<b>5</b>
<b>2.7. Teste de profundidade e buffers:.....</b>	<b>6</b>
<b>3. Modelos de iluminação.....</b>	<b>6</b>
<b>4. Comparações visuais e de desempenho entre os modos de iluminação.....</b>	<b>7</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>9</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho, parte avaliativa da disciplina de Computação Gráfica, consiste na visualização e manipulação interativa de modelos tridimensionais de árvores arteriais gerados pelo método CCO (Constrained Constructive Optimization). Esse método permite a construção de estruturas vasculares a partir de princípios fisiológicos e geométricos, resultando em arquivos no formato VTK (Visualization Toolkit), que reúnem informações essenciais como coordenadas 3D dos vértices, conectividade entre ramos e o raio de cada segmento.

A proposta central é implementar um sistema, em um ambiente gráfico interativo, capaz de ler e representar graficamente esses modelos em 3D, modelando os ramos vasculares como primitivas geométricas tridimensionais de espessura variável. O sistema permite a aplicação de transformações geométricas interativas, o uso de projeção em perspectiva com controle de câmera, além da aplicação de modelos de iluminação, transparência e remoção de superfícies ocultas (Z-buffer). Também são oferecidos recursos de interação 3D, como a seleção de segmentos para exibição de suas propriedades, e a animação temporal do crescimento da árvore arterial em 3D, a partir dos arquivos fornecidos. Para isso, foi utilizada a API OpenGL, que possibilita a renderização eficiente e o controle visual das estruturas arteriais.

## 2. Pipeline de renderização 3D implementado

O pipeline de renderização 3D implementado consiste na leitura dos dados geométricos a partir de arquivos VTK, na modelagem dos segmentos arteriais como cilindros 3D, aplicação de transformações geométricas e projeção da cena, seguida da rasterização e exibição interativa utilizando OpenGL.

### 2.1. Entrada de dados (Input / Aquisição):

Os dados geométricos da árvore arterial são carregados a partir de arquivos VTK 3D, contendo as coordenadas dos pontos, conectividade dos segmentos e raios associados.

- Estruturas:

C/C++

```
std::vector<Point3D> points;  
std::vector<Line3D> lines;
```

```
std::vector<float> radii;
```

- Carregamento ocorre via:

C/C++

```
loadCurrentGrowthFile();  
findGrowthFiles();
```

## 2.2. Modelagem geométrica:

Cada ramo arterial é modelado como um cilindro tridimensional orientado entre dois pontos consecutivos, com raio fixo ou variável conforme os dados do arquivo.

C/C++

```
drawCylinder(p0, p1, display_radius, cylinder_quality,  
base_r, base_g, base_b);
```

- Cálculo do vetor direção:

C/C++

```
Point3D dir = p1 - p0;  
dir.normalize();
```

## 2.3. Sistema de coordenadas e transformações:

Transformações geométricas são aplicadas por meio de uma câmera orbitante, permitindo rotação, zoom e navegação interativa da cena.

- Usados no código:

C/C++

```
camera.azimuth  
camera.elevation
```

```
camera.distance  
camera.updateEye();
```

- Mouse e teclado:

```
C/C++  
mouseMotion()  
keyboard()
```

## 2.4. Projeções (3D → 2D):

É utilizada projeção perspectiva para fornecer percepção de profundidade na visualização tridimensional.

```
C/C++  
gluPerspective(45.0f, aspect, 0.1f, 1000.0f);
```

## 2.5. Iluminação e sombreamento:

O sistema implementa iluminação manual nos modelos Flat e Phong, calculando componentes ambiente, difusa e especular, com cores baseadas no raio dos segmentos.

```
C/C++  
setupLightingFlat(...)  
setupLightingPhong(...)  
getColorFromRadius(...)
```

## 2.6. Rasterização:

As primitivas geométricas são rasterizadas pelo pipeline gráfico do OpenGL.

```
C/C++  
glBegin(GL_QUAD_STRIP)
```

```
glVertex3f(...)  
glEnd()
```

## 2.7. Teste de profundidade e buffers:

O teste de profundidade (Z-buffer) é utilizado para garantir a correta ocultação de superfícies, com suporte a transparência por meio de blending, resultando na exibição final da cena renderizada na tela.

```
C/C++  
glEnable(GL_DEPTH_TEST);  
glDepthFunc(GL_LEQUAL);  
glEnable(GL_BLEND);  
glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA);
```

- **Exibição final:**

```
C/C++  
display();  
displayText();  
glutSwapBuffers();
```

## 3. Modelos de iluminação

A renderização realista das árvores arteriais exige a aplicação de modelos que simulem a interação da luz com a superfície dos cilindros para destacar a volumetria e a profundidade dos ramos. O sistema implementado utiliza o modelo de reflexão de Phong para calcular a intensidade luminosa combinando as componentes ambiente, difusa e especular sobre a geometria tubular. No modelo de iluminação Flat, a tonalidade é calculada uma única vez para cada face que compõe o cilindro, resultando em uma representação facetada onde as

subdivisões poligonais são nitidamente visíveis ao observador. Em contrapartida, a implementação do modelo de iluminação Phong realiza o cálculo das intensidades de forma mais detalhada, permitindo a transição suave de cores ao longo da curvatura dos vasos e a exibição de destaques especulares (brilhos) que facilitam a percepção do diâmetro e da orientação espacial de cada segmento vascular.

Para que esses modelos de iluminação funcionem corretamente, é fundamental o cálculo preciso das normais de superfície em cada ponto da malha geométrica. No contexto deste trabalho, a normal de cada face do cilindro foi determinada através do produto vetorial entre dois vetores incidentes,  $v1$  e  $v2$ , pertencentes ao plano da face. Matematicamente, a normal unitária  $\hat{n}$  é obtida por:

$$\hat{n} = \frac{v1 \times v2}{||v1 \times v2||}$$

Este cálculo garante que o vetor resultante seja perpendicular à superfície e aponte para fora do objeto. No caso da iluminação suavizada (Phong), as normais nos vértices ( $n_v$ ) foram calculadas pela média das normais das faces adjacentes que compartilham aquele vértice, seguindo a lógica:

$$n_v = \frac{\sum_{i=1}^k \hat{n}_i}{\left\| \sum_{i=1}^k \hat{n}_i \right\|}$$

Onde  $k$  representa o número de faces que se encontram no vértice. Essa abordagem permite ao OpenGL interpolar os vetores durante a rasterização, evitando as transições abruptas de cor típicas do modelo Flat. A escolha desses modelos justifica-se pela necessidade de diferenciar ramos sobrepostos e proporcionar uma visualização técnica clara, onde as propriedades morfométricas, como o raio variável, sejam perceptíveis através do sombreamento realista da estrutura.

#### 4. Comparações visuais e de desempenho entre os modos de iluminação

A análise comparativa entre os dois modos de sombreamento implementados revela diferenças fundamentais na percepção da morfologia vascular e na qualidade da renderização 3D. No modo de Iluminação Flat, observa-se que o cálculo da luz é realizado de forma

constante para cada face dos polígonos que compõem os cilindros arteriais. Como demonstrado na imagem 1, isso resulta em uma visualização facetada onde as arestas da geometria são claramente visíveis, criando um aspecto artificial que dificulta a percepção da curvatura suave e natural dos vasos biológicos. Embora esse método seja computacionalmente mais simples, ele limita a fidelidade visual necessária para a análise detalhada de modelos gerados pelo método CCO.

Em contrapartida, a Iluminação Phong utiliza cálculos normais e intensidades que permitem uma transição de cores suave ao longo da superfície dos ramos, como visto na imagem 2. Essa técnica possibilita a inclusão de destaques especulares, os chamados brilhos, que são essenciais para simular a superfície úmida e lisa de vasos arteriais reais, auxiliando o observador a distinguir com precisão a volumetria e a profundidade de ramos que se sobrepõem no espaço tridimensional. A aplicação do modelo de Phong justifica-se, portanto, pela necessidade de oferecer uma representação realista que facilite a inspeção visual de estruturas complexas com diferentes raios e conectividades.

Relacionado à análise de desempenho, ambos os modelos de iluminação apresentaram resultados satisfatórios, mantendo uma taxa de quadros (FPS) alta e estável durante a interação com o usuário, incluindo operações de rotação de câmera, zoom e animação temporal. Apesar de o modelo Phong exigir uma carga matemática superior por fragmento para processar a suavização e os reflexos, não houve perda de fluidez perceptível no hardware utilizado para os testes. Dessa forma, a escolha do modelo de Phong como o padrão preferencial de visualização une a eficiência computacional à alta fidelidade geométrica exigida para a representação realista das árvores arteriais.



Imagem 1



Imagem 2

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BONFIM, Rafael. **Introdução aos Sistemas Gráficos, Dispositivos e Arquitetura**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1951379/mod\\_resource/content/1/2025-2\\_aula02\\_SistDispArqu.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1951379/mod_resource/content/1/2025-2_aula02_SistDispArqu.pdf)>. Acesso em: 10 de nov. de 2025.

BONFIM, Rafael. **Fundamentos de Programação Gráfica**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1957405/mod\\_resource/content/1/2025\\_2\\_aula03\\_Fundprog.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1957405/mod_resource/content/1/2025_2_aula03_Fundprog.pdf)>. Acesso em: 10 de nov. de 2025.

BONFIM, Rafael. **Teoria das Cores e Modelos de Cor**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1963758/mod\\_resource/content/1/2025\\_2\\_aula07\\_TeoriaCores\\_v01.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1963758/mod_resource/content/1/2025_2_aula07_TeoriaCores_v01.pdf)>. Acesso em: 13 de nov. de 2025.

BONFIM, Rafael. **Primitivas e Atributos**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1963759/mod\\_resource/content/1/2025\\_2\\_aula05\\_Primitivas\\_Atributos\\_v02.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1963759/mod_resource/content/1/2025_2_aula05_Primitivas_Atributos_v02.pdf)>. Acesso em: 15 de nov. de 2025.

BONFIM, Rafael. **Modelagem de Objetos Geométricos Elementares**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1966341/mod\\_resource/content/1/2025\\_2\\_aula06\\_BCC327\\_ModelagemObjetos\\_v01.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1966341/mod_resource/content/1/2025_2_aula06_BCC327_ModelagemObjetos_v01.pdf)>. Acesso em: 15 de nov. de 2025.

BONFIM, Rafael. **Transformações Geométricas 2D e 3D**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1970705/mod\\_resource/content/1/2025\\_2\\_aula07\\_Transform2D\\_3D\\_v02.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1970705/mod_resource/content/1/2025_2_aula07_Transform2D_3D_v02.pdf)>. Acesso em: 18 de nov. de 2025.

BONFIM, Rafael. **Operações com Dados Geométricos e Posicionamento do Observador**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1971824/mod\\_resource/content/1/2025\\_2\\_aula08\\_operacoes\\_posicoes\\_v2.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1971824/mod_resource/content/1/2025_2_aula08_operacoes_posicoes_v2.pdf)>. Acesso em: 20 de nov. de 2025.

BONFIM, Rafael. **Tipos de Projeção**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1973240/mod\\_resource/content/1/2025\\_2\\_aula09\\_tipos\\_projecoos\\_%20v01.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1973240/mod_resource/content/1/2025_2_aula09_tipos_projecoos_%20v01.pdf)>. Acesso em: 22 de nov. de 2025.

BONFIM, Rafael. **Fontes de Luz**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1974062/mod\\_resource/content/1/2025\\_2\\_aula10\\_fontes\\_luz\\_v02.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1974062/mod_resource/content/1/2025_2_aula10_fontes_luz_v02.pdf)>. Acesso em: 25 de nov. de 2025.

BONFIM, Rafael. **Iluminação e Interação com Superfícies: Modelo de Sombreamento Flat (Constante)**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1980138/mod\\_resource/content/1/2025\\_2\\_aula11\\_IluminacaoFlat\\_v02.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1980138/mod_resource/content/1/2025_2_aula11_IluminacaoFlat_v02.pdf)>. Acesso em: 27 de nov. de 2025.

BONFIM, Rafael. **Iluminação e Interação com Superfícies: Modelo de Gouraud (Iluminação por Vértices)**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1980141/mod\\_resource/content/1/2025\\_2\\_aula12\\_IluminacaoGourand\\_v02.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1980141/mod_resource/content/1/2025_2_aula12_IluminacaoGourand_v02.pdf)>. Acesso em: 28 de nov. de 2025.

BONFIM, Rafael. **Modelo de Iluminação e Interação com Superfícies: Modelo de Phong: Shading por Pixel (Per-Pixel Shading)**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1980142/mod\\_resource/content/1/2025\\_2\\_aula13\\_IluminacaoPhong\\_v02.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1980142/mod_resource/content/1/2025_2_aula13_IluminacaoPhong_v02.pdf)>. Acesso em: 30 de nov. de 2025.

BONFIM, Rafael. **Modelos de Transparência: Alpha Blending e Ordem de Desenho (Fixed Pipeline)**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1980143/mod\\_resource/content/1/aula14\\_transparencia\\_v02.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1980143/mod_resource/content/1/aula14_transparencia_v02.pdf)>. Acesso em: 02 de dez. de 2025.

BONFIM, Rafael. **Mapeamento de Textura**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1980144/mod\\_resource/content/1/2025\\_2\\_Mapeamento\\_Textura\\_v01.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1980144/mod_resource/content/1/2025_2_Mapeamento_Textura_v01.pdf)>. Acesso em: 05 de dez. de 2025.

BONFIM, Rafael. **Recorte de Segmentos de Retas: Algoritmo de Cohen-Sutherland**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1983736/mod\\_resource/content/1/2025\\_2\\_Recorte\\_Reta\\_CohenSutherland\\_v02.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1983736/mod_resource/content/1/2025_2_Recorte_Reta_CohenSutherland_v02.pdf)>. Acesso em: 21 de jan. de 2026.

BONFIM, Rafael. **Recorte de Segmentos de Retas: Algoritmo Liang-Barsky (Paramétrico)**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1983737/mod\\_resource/content/1/2025\\_2\\_Recorte\\_Retas\\_LiangBarsky\\_v02.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1983737/mod_resource/content/1/2025_2_Recorte_Retas_LiangBarsky_v02.pdf)>. Acesso em: 21 de jan. de 2026.

BONFIM, Rafael. **Recorte de Segmentos de Retas: Algoritmo Cyrus-Beck (Recorte Paramétrico Geral)**. DECOM – ICEB – UFOP – 2025.2. Disponível em: <[https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1984259/mod\\_resource/content/1/2025\\_2\\_Recorte\\_Retas\\_Cyrus-Beck\\_v01.pdf](https://moodlepresencial.ufop.br/pluginfile.php/1984259/mod_resource/content/1/2025_2_Recorte_Retas_Cyrus-Beck_v01.pdf)>. Acesso em: 21 de jan. de 2026.