Relatório Técnico

Pratical Assignment

Trabalho Prático
Computação Gráfica

Universidade do Minho

Universidade do Minho
Escola de Engenharia, Braga, Portugal
Licenciatura em Engenharia Informática

Ano Letivo 2025/2026

Grupo 25
Carlos Silva; Francisco Veloso; Nuno Soares; Duarte Faria
a106792@uminho.pt
a106882@uminho.pt
a107366@uminho.pt
a95609@uminho.pt

Conteúdo

1 Introdução

O presente relatório descreve o desenvolvimento da primeira fase do Trabalho Prático da unidade curricular de Computação Gráfica. O objetivo principal desta fase consistiu na construção da base de um motor gráfico 3D, recorrendo à biblioteca OpenGL/GLUT, e na implementação de um sistema modular composto por duas aplicações distintas: um *generator*, responsável pela criação das primitivas geométricas, e um *engine*, encarregado da leitura de ficheiros de configuração e da renderização da cena.

Ao longo do trabalho, implementámos as várias primitivas tridimensionais, diferentes modos de visualização e um sistema de câmara configurável, cumprindo assim a estrutura fundamental que servirá de base para as fases seguintes do projeto que o nosso grupo implementará.

2 Fase 1: Primitivas e Motor de Visualização

O objetivo da Fase 1 é construir a base do motor 3D que será desenvolvido ao longo das quatro fases do trabalho. Esta fase foca-se em dois componentes fundamentais:

1. **Generator** — aplicação independente que gera ficheiros `.3d` contendo os vértices das primitivas geométricas.
2. **Engine** — aplicação que lê um ficheiro XML de configuração (câmera, janela, modelos) e renderiza a cena com OpenGL/GLUT.

A separação em dois programas distintos permite que a computação pesada da geometria seja feita apenas uma vez.

2.1 Fluxo de Dados

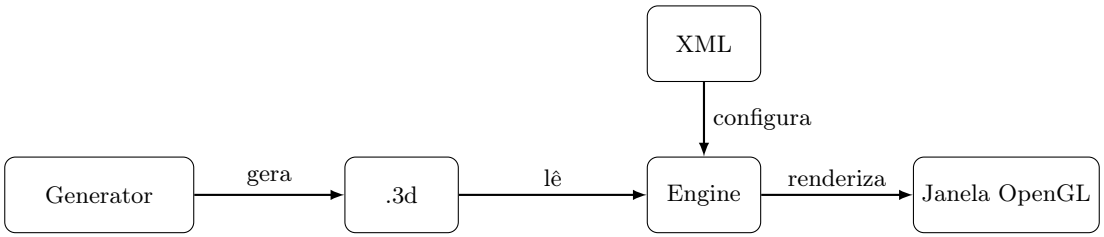


Figura 1: Fluxo de dados entre os componentes.

2.2 Generator — Geração de Primitivas

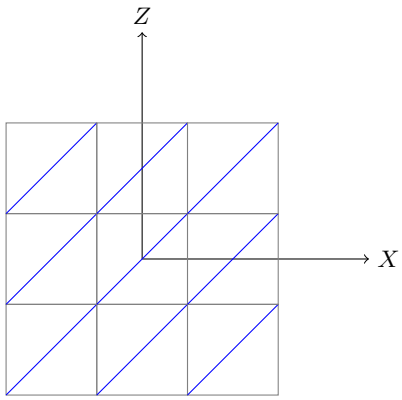
A abordagem adotada no *generator* baseia-se em superfícies paramétricas. Uma decisão fundamental foi o uso do *Counter-Clockwise Winding Order* para todos os triângulos, garantindo que as faces externas sejam corretamente renderizadas pelo OpenGL com *Back-face Culling* ativo. Ao definir os vértices nesta ordem, a face frontal de cada polígono é determinada pela regra da mão direita, permitindo que o *engine* descarte a renderização de faces internas ou não visíveis.

2.2.1 Plano (Plane)

O plano é gerado no plano XZ ($y = 0$), centrado na origem, com um dado comprimento L e número de subdivisões D.

2.2.2 Algoritmo

1. Calcular o tamanho de cada subdivisão: $s = L/D$
2. Calcular o offset de centralização: $h = L/2$
3. Para cada célula (i, j) da grelha $D \times D$:
   - Calcular os 4 cantos: $(x_1, z_1) = (-h + i \cdot s,\ -h + j \cdot s)$ e $(x_2, z_2) = (-h + (i{+}1) \cdot s,\ -h + (j{+}1) \cdot s)$
   - Emitir triângulo 1: $(x_1, 0, z_1),\ (x_1, 0, z_2),\ (x_2, 0, z_2)$
   - Emitir triângulo 2: $(x_1, 0, z_1),\ (x_2, 0, z_2),\ (x_2, 0, z_1)$



Plano com 3 divisões (vista de cima)

Figura 2: Subdivisão do plano. A diagonal azul indica a divisão de cada quad em dois triângulos.

2.2.3 Caixa (Box)

A caixa é centrada na origem com um dado tamanho S e número de divisões D por aresta. Cada uma das 6 faces é uma grelha de $D \times D$ quads, cada quad dividido em 2 triângulos.

2.2.4 Algoritmo

1. Calcular: $h = S/2$ (metade do tamanho), $s = S/D$ (passo da subdivisão)
2. Para cada uma das 6 faces (frente, trás, direita, esquerda, cima, baixo):
   - Para cada célula (i, j) da grelha $D \times D$:
     - Calcular os 4 cantos do quad na face
     - Emitir 2 triângulos com *winding* CCW (visto de fora)

Decisão de projeto: A normal de cada face aponta para fora da caixa. Os triângulos são emitidos com ordem CCW quando vistos do exterior, garantindo compatibilidade com *back-face culling*.

O número total de vértices para a caixa é:

$$V_{\text{box}} = 6 \times D^2 \times 2 \times 3 = 36 \cdot D^2$$

2.2.5 Esfera (Sphere)

A esfera é gerada a partir da conversão de coordenadas esféricas para coordenadas cartesianas. No código, adotámos a convenção em que o ângulo θ representa a componente polar e o ângulo ϕ a componente azimutal.

Equações Paramétricas:

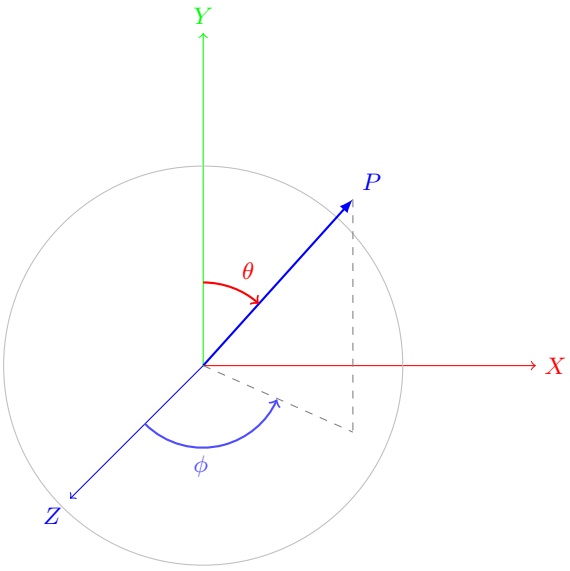
$$\begin{cases} x = r \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) \\ y = r \cdot \cos(\theta) \\ z = r \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \end{cases} \tag{1}$$

A utilização direta de $\cos(\theta)$ no eixo Y mostra que este é o eixo vertical da esfera, ficando assim alinhado com o sistema de coordenadas padrão do OpenGL.

Durante a implementação, tivemos o cuidado de tratar corretamente os polos da esfera. No topo ($\theta = 0$) e na base ($\theta = \pi$), todos os pontos de cada *slice* coincidem no mesmo local. Se gerássemos quadriláteros nessas zonas (ou seja, dois triângulos por divisão), iríamos obter triângulos degenerados, com área nula.

Para evitar esse problema, o algoritmo identifica as camadas correspondentes aos polos e, nessas situações, gera apenas um triângulo por *slice*, formando um *triangle fan* que converge no polo. Desta forma, reduzimos o número de vértices desnecessários, tornando o processo ligeiramente mais eficiente.

A superfície da esfera é dividida em *slices* S_l (divisões ao longo do ângulo azimutal) e *stacks* S_t (divisões ao longo do ângulo polar). Cada quadrilátero formado entre duas *stacks* e duas *slices* é dividido em dois triângulos através da diagonal que liga o vértice v_1 ao vértice v_3.



θ: ângulo polar, ϕ: ângulo azimutal

Figura 3: Sistema de coordenadas esféricas utilizado na geração da Esfera.

2.2.6 Algoritmo

1. Para cada stack i $(0 \leq i < S_t)$:
   - Calcular $\theta_1 = \pi \cdot i/S_t$ e $\theta_2 = \pi \cdot (i{+}1)/S_t$
2. Para cada slice j $(0 \leq j < S_l)$:
   - Calcular $\phi_1 = 2\pi \cdot j/S_l$ e $\phi_2 = 2\pi \cdot (j{+}1)/S_l$
   - Calcular os 4 vértices: $v_1(\theta_1, \phi_1)$, $v_2(\theta_2, \phi_1)$, $v_3(\theta_2, \phi_2)$, $v_4(\theta_1, \phi_2)$
   - Se $i \neq S_t - 1$: emitir triângulo v_1, v_2, v_3 (não degenera no polo sul)
   - Se $i \neq 0$: emitir triângulo v_1, v_3, v_4 (não degenera no polo norte)

Tratamento dos polos: No polo norte ($\theta = 0$), os vértices v_1 e v_4 coincidem no ponto $(0, r, 0)$, pelo que o triângulo $v_1 v_3 v_4$ degenera e é omitido. No polo sul ($\theta = \pi$), v_2 e v_3 coincidem em $(0, -r, 0)$, pelo que o triângulo $v_1 v_2 v_3$ degenera e é omitido.

O número total de triângulos é:

$$T_{\text{sphere}} = 2 \cdot S_l \cdot (S_t - 2) + 2 \cdot S_l = 2 \cdot S_l \cdot (S_t - 1)$$

2.2.7 Cone

O cone é gerado com a base no plano XZ $(y = 0)$, centrado na origem. O raio diminui linearmente com a altura, de R (na base) a 0 (no vértice).

2.2.8 Geometria do Cone

Para uma stack i ($0 \leq i < S_t$), o raio e a altura são:

$$r_i = R\left(1 - \frac{i}{S_t}\right) \tag{2}$$

$$y_i = h \cdot \frac{i}{S_t} \tag{3}$$

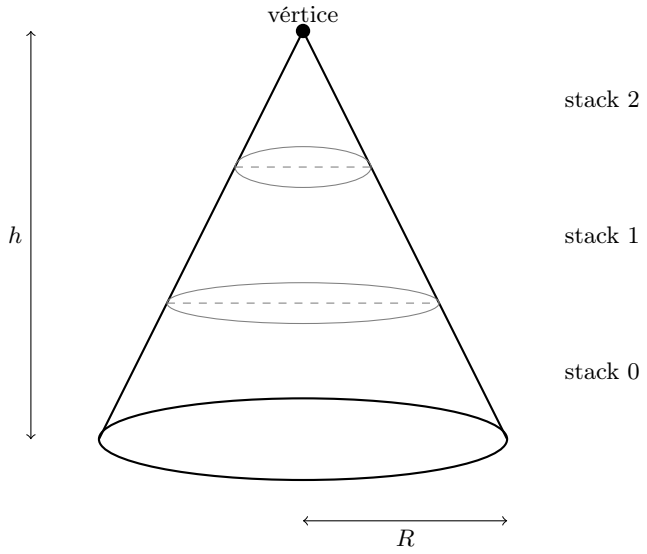


Figura 4: Estrutura do cone com 3 stacks.

2.2.9 Algoritmo

1. **Base** — leque (fan) de triângulos no plano XZ:
   - Para cada *slice* j, é emitido um triângulo com centro em $(0, 0, 0)$ e dois pontos consecutivos da circunferência da base (ordem CCW quando observado de baixo, com a normal orientada segundo $-Y$).
2. **Corpo** — dividido em *stacks*:
   - Para cada *stack* i e *slice* j:
     - Calculam-se os quatro vértices v_1, v_2, v_3, v_4 que definem o *quad*;
     - Emite-se o triângulo v_1, v_3, v_2 (ordem CCW quando observado do exterior);
     - Se $i \neq S_t - 1$ (ou seja, se não for a última *stack*), emite-se também o triângulo v_1, v_4, v_3.

Na última stack, os vértices superiores convergem no vértice do cone, pelo que apenas é emitido um triângulo por slice.

2.3 Engine — Motor Gráfico

2.3.1 Formato do Ficheiro .3d

O formato de ficheiro adotado para armazenar os modelos é simples e textual:

– **Linha 1**: número total de vértices N

– **Linhas 2 a** $N+1$: coordenadas x y z de cada vértice (um por linha)

Os vértices são armazenados em grupos de 3 (formando triângulos), na ordem em que devem ser desenhados com `GL_TRIANGLES`. O *winding order* é **counter-clockwise** (CCW), que é o default do OpenGL para *front faces*.

2.3.2 Leitura da Configuração XML

Usámos a biblioteca *TinyXML-2* para interpretar o ficheiro de cena já que foi a que nos foi recomendada. A decisão de usar XML permite configurar a resolução da janela e os parâmetros da câmara sem necessidade de recompilar o código, garantindo flexibilidade na montagem de diferentes cenários.

O engine recebe como argumento um ficheiro XML que define:

– **Janela**: dimensões (largura, altura)
– **Câmera**: posição, ponto de foco (*lookAt*), vetor *up*, e parâmetros de projeção (FOV, *near*, *far*)
– **Modelos**: lista de ficheiros `.3d` a carregar

Alguns Valores por omissão são definidos para os campos opcionais (`up` $= (0, 1, 0)$, `fov` $= 60$, `near` $= 1$, `far` $= 1000$), conforme especificado na sintaxe do file XML de referência colocado na blackboard.

2.3.3 Pipeline de Renderização

A renderização segue o pipeline clássico do OpenGL com GLUT:

1. **Inicialização**: `glutInit`, configuração do modo de display (RGBA, double buffer, depth buffer), criação da janela.
2. **Configuração OpenGL**: ativação do *depth test* e *back-face culling*.
3. **Registo de callbacks**: display, reshape, keyboard.
4. **Ciclo principal**: `glutMainLoop`.

2.3.4 Callback de Reshape

No redimensionamento da janela:

1. Ativar a matriz de projeção
2. Resetar a matriz
3. Configurar o *viewport* e aplicar a projeção perspetiva com os parâmetros do XML
4. Voltar à matriz de *modelview*

2.3.5 Callback de Display

A cada frame:

1. Limpar buffers de cor e profundidade
2. Posicionar a câmera com `gluLookAt`
3. Definir o modo de polígono (*solid*/*wireframe*/*points*)
4. Desenhar eixos de referência (com *depth test* ativo)
5. Desenhar os modelos com triângulos (modo imediato)
6. Trocar buffers (*double buffering*)

Nota: Desenhámos os eixos **antes** dos modelos, mantendo o *depth test* ativo em ambos os casos. Isto garante que a geometria dos modelos que está mais próxima da câmara se sobrepõe naturalmente aos eixos, o que respeita corretamente a profundidade.

Inicialmente, não tínhamos implementado desta forma e encontrámos alguns problemas na renderização das figuras. Embora a figura fosse estruturalmente igual à dos testes, algumas linhas que evidenciavam a profundidade não eram renderizadas corretamente.

2.3.6 Sistema de Câmera

Foram implementados dois modos de câmera:

2.3.7 Câmera Fixa (XML)

Usa diretamente os valores de posição, *lookAt* e *up* definidos no ficheiro XML.

2.3.8 Câmera Orbital (Explorer)

Implementou-se uma câmara orbital baseada em coordenadas esféricas para facilitar a inspeção dos modelos. O utilizador controla os ângulos α (rotação horizontal) e β (inclinação vertical).

Algorithm 1 Conversão para Câmara Orbital

1: $pos.x \leftarrow raio \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\alpha)$
2: $pos.y \leftarrow raio \cdot \sin(\beta)$
3: $pos.z \leftarrow raio \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha)$

onde α é o ângulo azimutal, β é a elevação (limitada a ± 1.5 rad $\approx \pm 86$ para evitar *gimbal lock*), e r é a distância ao foco (Q/E).

A câmera orbital é inicializada a partir da posição XML, convertendo coordenadas cartesianas para esféricas:

$$r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} \tag{4}$$

$$\alpha = \text{atan2}(p_x,\ p_z) \tag{5}$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{p_y}{r}\right) \tag{6}$$

2.3.9 Modos de Renderização

Três modos são suportados:

Tecla	Modo	Descrição
1	Sólido	Faces preenchidas
2	Wireframe	Apenas arestas
3	Pontos	Apenas vértices

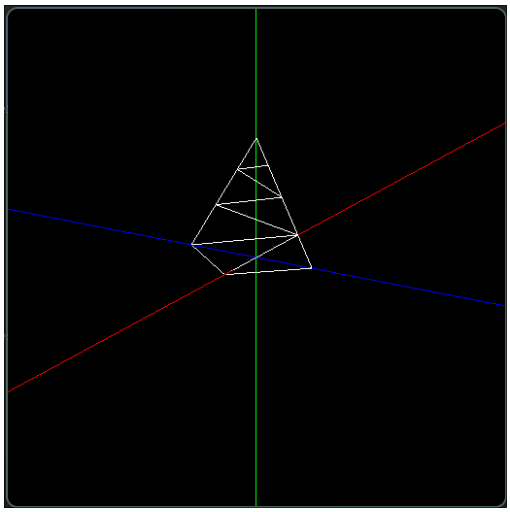
Tabela 1: Modos de renderização disponíveis.

2.3.10 Controlos Adicionais

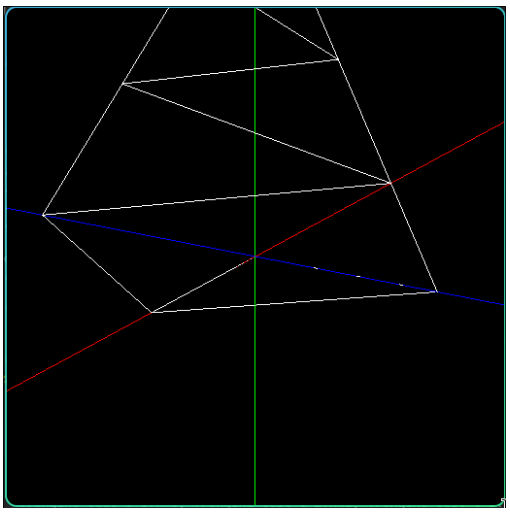
Tecla	Ação
W/S	Rodar câmera verticalmente (elevação)
A/D	Rodar câmera horizontalmente (azimute)
Q/E	Zoom in/out (alterar raio)
C	Alternar câmera fixa/orbital
ESC	Sair da aplicação

Tabela 2: Controlos do engine.

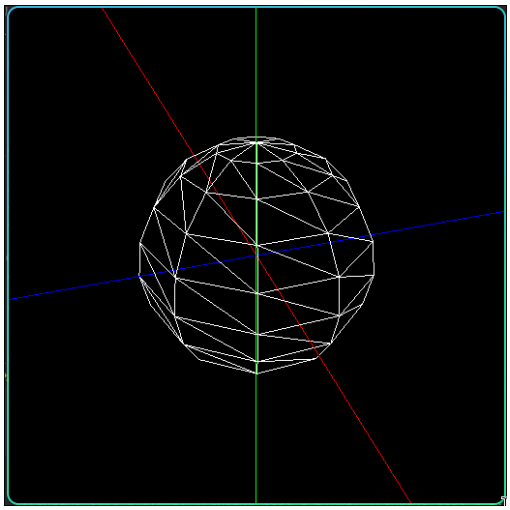
2.4 Resultados obtidos



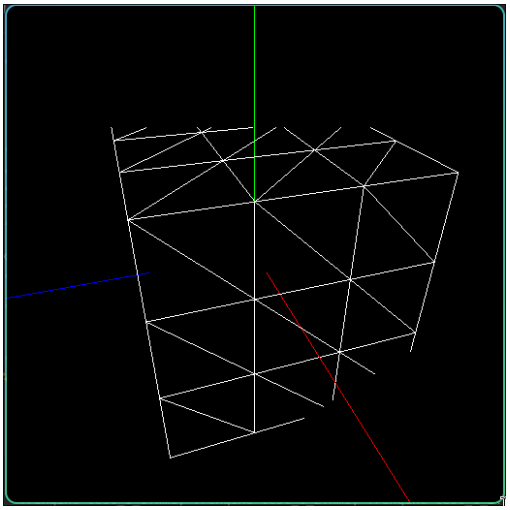
(a) Teste 1



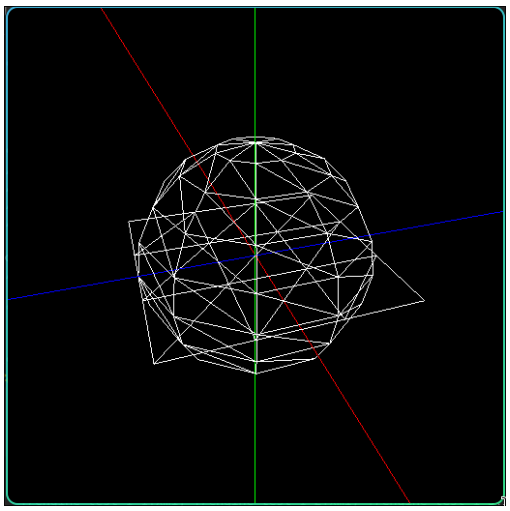
(b) Teste 2



(c) Teste 3



(d) Teste 4



(e) Teste 5

Figura 5: Resultados dos testes

2.5 Conclusão

Nesta primeira fase, implementámos corretamente as quatro primitivas que nos foram solicitadas no generator, bem como o engine capaz de ler as configurações em XML e renderizar os modelos com OpenGL/GLUT, tal como praticámos nas aulas. O nosso projeto inclui algumas configurações de câmaras, como a fixa e a orbital, três modos de renderização e os respetivos eixos de referência.

De uma forma geral, o nosso grupo sente que conseguiu realizar, sem grandes dificuldades, o que nos foi proposto para esta primeira fase de entrega. O único detalhe que demorou um pouco mais a ser concretizado foi a confirmação e correção da imagem produzida pelo nosso engine, de modo a que fosse exatamente igual à fornecida na diretoria com as imagens dos resultados esperados. A parte de gerar as figuras decorreu sem problemas. No entanto, garantir que ficassem exatamente iguais às imagens de teste exigiu mais algum tempo.

Referências

1. Não foram utilizadas referências bibliográficas externas. O trabalho foi desenvolvido com base nos slides teóricos, práticos e os guiões lecionados na unidade curricular.