

# Informática Gráfica I

Curso 2023/2024

Facultad de Informática

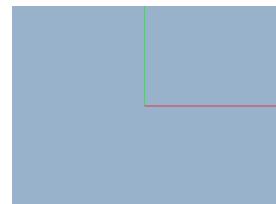
Universidad Complutense de Madrid

## Entrega I Apartados del 1 al 17

Fecha de entrega: 22 de febrero de 2024

### Apartado 1 .....

Localiza el comando que fija el color de fondo y cambia el color a  $(0.6, 0.7, 0.8)$ .



### Apartado 2 .....

En la clase `Mesh`, define el método:

```
static Mesh* generateRegularPolygon(GLuint num, GLdouble r)
```

que genere los `num` vértices que forman el polígono regular inscrito en la circunferencia de radio  $r$ , sobre el plano  $Z = 0$ , centrada en el origen. Utiliza la primitiva `GL_LINE_LOOP`. Recuerda que las ecuaciones de una circunferencia de centro  $C = (C_x, C_y)$  y radio  $R$  sobre el plano  $Z = 0$  son:

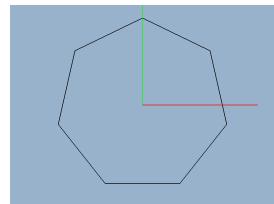
$$x = C_x + R \cdot \cos(\alpha)$$

$$y = C_y + R \cdot \sin(\alpha)$$

Genera los vértices empezando por el que se encuentra en el eje Y ( $\alpha=90^\circ$ ) y, para los siguientes, aumenta el ángulo en  $360^\circ/\text{num}$  (ojo con la división). Usa las funciones trigonométricas `cos(alpha)` y `sin(alpha)` de `glm`, que requieren que el ángulo `alpha` esté en radianes, para lo que puedes usar el conversor de `glm` para `radians(alpha)`, que pasa alfa grados a radianes.

### Apartado 3 .....

Define la clase `RegularPolygon` que hereda de `Abs_Entity` y cuya malla se construye usando el método del apartado anterior. Incorpora un objeto de esta nueva clase a la escena. En la captura adjunta se muestra un heptágono regular.



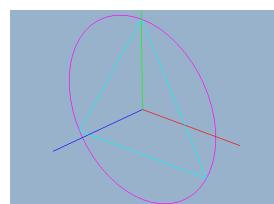
### Apartado 4 .....

Añade a la clase `Abs_Entity` un atributo `glm::dvec4 mColor`, para dotar de color a una entidad, sin tener que dar color a los vértices de su malla. Inicializa este atributo a 1 en la constructora (`mColor(1)`), y define sus métodos `get` y `set`. Modifica el método `render()` de la clase `Polygon` para que tenga en cuenta el color. Para establecer el color utiliza el comando  `glColor4d(mColor.r, mColor.g, mColor.b, mColor.a)`.

**No olvides restablecer el color por defecto antes de terminar la renderización.**

### Apartado 5 .....

Añade a la escena un triángulo cian y una circunferencia magenta como objetos de la clase `RegularPolygon`, tal como se muestra en la figura.



### Apartado 6 .....

Define la clase `RGBTriangle` que hereda de `Abs_Entity` y cuyos objetos se renderizan como el de la captura de la imagen. Observa que solo tienes que añadir colores apropiados a los vértices de una malla triangular de la clase `RegularPolygon`. Añade uno de estos triángulos a la escena.



### Apartado 7 .....

Redefine el método `render()` para establecer que el triángulo se rellene por la cara **FRONT** mientras que por la cara **BACK** se dibuja con líneas. Haz lo mismo, pero que las caras traseras se dibujen con puntos.

## Apartado 8 .....

Define el método:

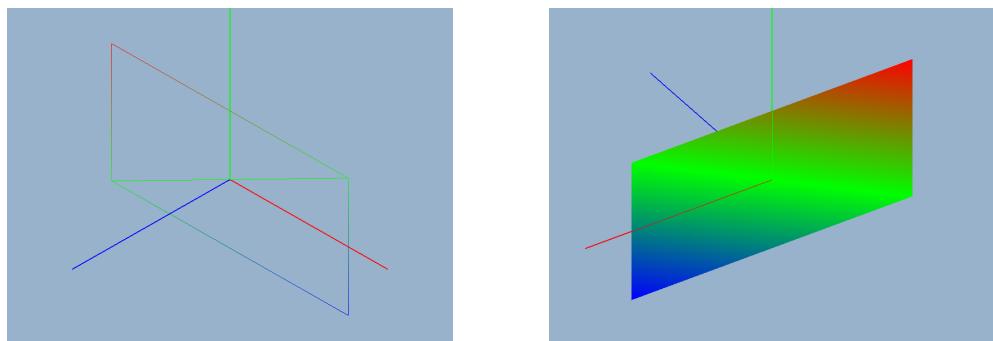
```
static Mesh* generateRectangle(GLdouble w, GLdouble h)
```

que genera los cuatro vértices del rectángulo centrado en el origen, sobre el plano  $Z = 0$ , de ancho  $w$  y alto  $h$ . Utiliza la primitiva `GL_TRIANGLE_STRIP`.

Define el método:

```
static Mesh* generateRGBRectangle(GLdouble w, GLdouble h)
```

que añade un color primario a cada vértice (un color se repite), como se muestra en las capturas. Define la clase `RGBRectangle` que hereda de `Abs_Entity`, y añade una entidad de esta clase a la escena. Redefine su método `render()` para establecer que los triángulos se rellenen por la cara **BACK** y se muestren con líneas, por la cara **FRONT**.

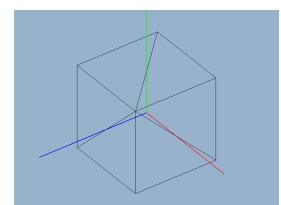


## Apartado 9 .....

Define el método:

```
static Mesh* generateCube(GLdouble length)
```

que construye la malla de un cubo (hexaedro) con arista de tamaño  $length$ , centrado en el origen. Define la clase `Cube` que hereda de `Abs_Entity`, y añade una entidad de esta clase a la escena. Renderízalo con las caras frontales en modo línea (con color negro) y las traseras, en modo punto, como en la captura adjunta.

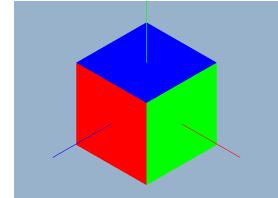


## Apartado 10 .....

Extiende la malla anterior con color en los vértices definiendo el método estático:

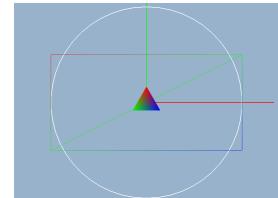
```
static Mesh* generateRGBCubeTriangles(GLdouble length)
```

El color es el que se muestra en la captura. Define la clase RGBCube que hereda de `Abs_Entity`, y añade una entidad de esta clase a la escena.



## Apartado 11 .....

Construye sendas escenas, una bidimensional con un rectángulo como el del apartado 8 que contiene en su interior un pequeño triángulo RGB, como el del 6, al que rodea una circunferencia como la del apartado 5, y otra escena tridimensional con un cubo como el del apartado anterior.



## Apartado 12 .....

Define el método setter `setScene(id)` del atributo `mId` de la clase `Scene`. Implementa los eventos de teclado ‘0’ y ‘1’ para permitir cambiar entre la escena **0**, que será la bidimensional, y la **1**, que será la tridimensional.

## Apartado 13 .....

Añade a la clase `Abs_Entity` un método `virtual void update()` {} que se usa para modificar la `mModelMat` de aquellas entidades que la cambien, por ejemplo, en animaciones. Añade a la clase `Scene` un método `void update()` que haga que las entidades de `gObjects` se actualicen mediante su método `update()`. Define en `IG1App` el evento de la tecla ‘u’ para hacer que la escena se actualice con una llamada a su método `update()`.

## Apartado 14 .....

Coloca el triángulo RGB de la escena **0** en el punto **(R, 0)**, siendo *R* el radio de la circunferencia de esa escena.

## Apartado 15 .....

Define el método `update()` en la clase `RGBTriangle` de forma que el triángulo de esta clase de la escena **0**, rote en horario sobre sí mismo a la par que lo hace en anti horario sobre la circunferencia.

#### **Apartado 16** .....

Programa el método `update()` (sin argumentos) en la clase `IG1App`, que es usado por el callback de `glutIdleFunc`. Haz que este método se ejecute en el evento de teclado '**U**'.

#### **Apartado 17** .....

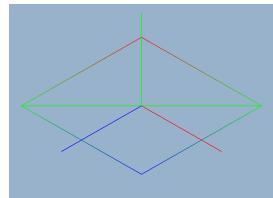
**(Opcional)** Programa el método `update()` de la clase `RGBCube` tal como se muestra en la grabación “*demonstración de la escena 1*”.

## Entrega II Apartados del 18 al 38

### Fecha de entrega: 8 de marzo de 2024

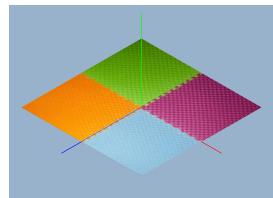
#### Apartado 18 .....

Define la entidad `Ground` cuyos objetos se renderizan como rectángulos centrados en el origen que descansan sobre el plano  $Y = 0$ . En la constructora, utiliza la malla `generateRectangle()` definida más arriba y establece la matriz de modelado para que el suelo se muestre siempre en posición horizontal.



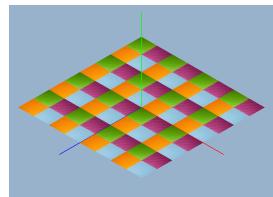
#### Apartado 19 .....

Define en la clase `Mesh` el método `static Mesh* generateRectangleTexCor(GLdouble w, GLdouble h)` que añade coordenadas de textura para cubrir el rectángulo con una textura. Modifica la constructora de `Ground` y su renderización para que se muestre el suelo con la textura de la captura adjunta. No olvides modularla con el color blanco.



#### Apartado 20 .....

Modifica el método del apartado anterior y define el método `static Mesh* generateRectangleTexCor(GLdouble w, GLdouble h, GLuint rw, GLuint rh)` que genera coordenadas de textura para que la imagen de la textura embaldose el suelo, repitiéndola  $rw$  veces a lo ancho y  $rh$  veces a lo alto. En la captura,  $rw = rh = 4$ .

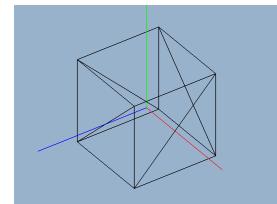


#### Apartado 21 .....

Define el método `static Mesh* generateBoxOutline(GLdouble length)` que genera los vértices del contorno de un cubo, sin tapas, centrado en los tres ejes, con lado de tamaño longitud. Utiliza la primitiva `GL_TRIANGLE_STRIP`. Recuerda que el número de vértices, con esta primitiva, es 10: los 8 del cubo más 2 repetidos para cerrar el contorno.

## Apartado 22 .....

Define la clase `BoxOutline` que hereda de `Abs_Entity` y cuyos objetos se renderizan como cubos sin tapas, usando la malla del apartado anterior. En la captura se muestra el contorno de una caja, con las caras frontales y traseras en modo líneas.



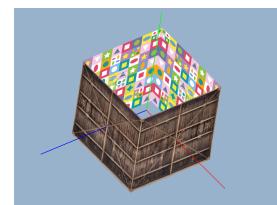
## Apartado 23 .....

Añade coordenadas de textura a la malla del contorno de una caja, definiendo el método `static Mesh* generateBoxOutlineTexCor(GLdouble length)`. Haz que la escena contenga el contorno de una caja con la textura que se muestra en la captura adjunta, repetida por las caras del contorno.



## Apartado 24 .....

Modifica el método `render()` de la clase `BoxOutline` de forma que se pueda renderizar la caja con dos texturas, una para el exterior y otra para el interior. Añade para ello otro atributo de tipo `Texture*` y utiliza apropiadamente el *culling*.

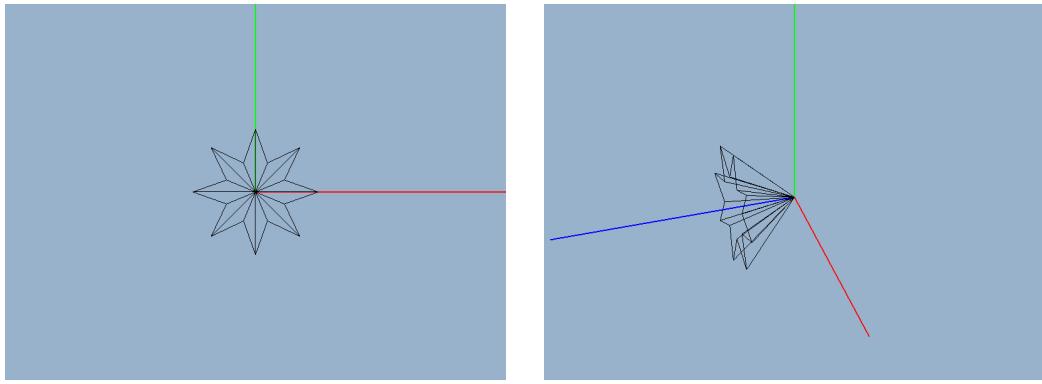


## Apartado 25 .....

Define el método:

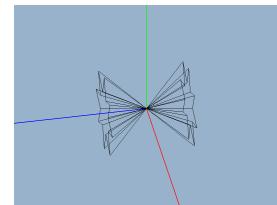
```
static Mesh* generateStar3D(GLdouble re, GLuint np, GLdouble h)
```

que genera los vértices de una estrella de `np` puntas situadas en los puntos de una circunferencia de radio exterior `re` centrada en el plano  $Z = h$ , como la que se muestra en las capturas. Utiliza la primitiva `GL_TRIANGLE_FAN` tomando como primer vértice el origen  $(0, 0, 0)$ . Los puntos internos se encuentran en una circunferencia de radio  $ri = re/2$ .



### Apartado 26 .....

Define la clase `Star3D` que hereda de `Abs_Entity` y cuyos objetos se renderizan en estrellas como las mostradas. Modifica el método `render()` de esta clase de forma que se muestren no una sino dos estrellas unidas por el origen, tal como se muestra en la captura.



### Apartado 27 .....

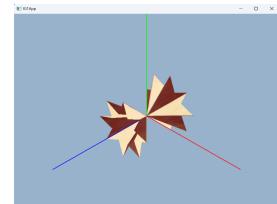
Define el método `update()` de la clase `Star3D` de forma que las dos estrellas enfrentadas roten coordinadamente sobre su eje Z a la vez que giran sobre su eje Y.

### Apartado 28 .....

Define el método:

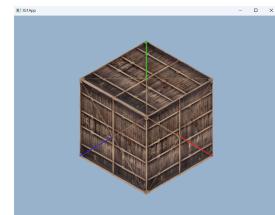
```
static Mesh* generateStar3DTexCor(GLdouble re, GLuint np, GLdouble h)
```

que genera coordenadas de textura para la malla de una estrella. Modifica la constructora de `Estrella3D` y el método `render()` para renderizar la estrella con textura tal como se muestra en la captura, con una estrella de 8 puntas.



## Apartado 29 .....

**(Opcional)** Define la clase Box mediante la malla de un contorno de caja junto con dos mallas de rectángulo más, una para la tapa y otra para el fondo. La renderización de una caja se muestra en la captura. Aunque no se ven, las caras interiores de la caja tienen todas, la textura interior del contorno de una caja.



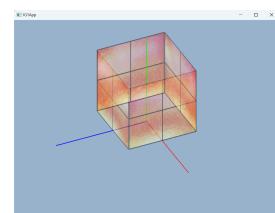
## Apartado 30 .....

**(Opcional)** Define el método update() de la clase Box de forma que la tapa se abra 180° para después volver a cerrarse y así sucesivamente.



## Apartado 31 .....

Define la clase GlassParapet cuyos objetos se renderizan en contornos de caja con una textura translúcida en todas sus caras, tal como se muestra en la captura adjunta.



## Apartado 32 .....

**(Opcional)** En la clase Texture, programa un método

```
void load(const string& BMP_Name, u8vec3 color, GLubyte alpha)
```

que cargue una textura localizada en el path dado por el primer argumento, cambiando la componente alfa de los texeles cuyo color sea el dado en el segundo argumento, por el valor especificado por el tercer argumento. El resto de los *texeles* mantiene su valor alfa original.

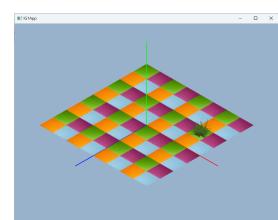
### Apartado 33 .....

*(Opcional)* Utilizando el método del apartado anterior, carga la textura `grass.bmp`, con el color de fondo (negro) transparente, manteniendo la opacidad en el resto.



### Apartado 34 .....

*(Opcional)* Define la clase `Grass` cuyos objetos se renderizan encima del suelo, en una esquina, mostrando la textura anterior (con fondo transparente), rotada y renderizada tres veces.



### Apartado 35 .....

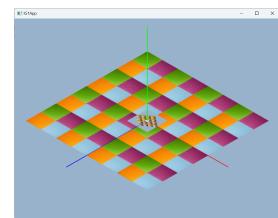
En la clase `Texture`, define un método

```
void loadColorBuffer(GLsizei width, GLsizei height, GLuint buffer=GL_FRONT)
```

que cargue el buffer de color (frontal o trasero) dado por el tercer argumento, como una textura de dimensiones dadas por los parámetros primero y segundo.

### Apartado 36 .....

Define la clase `Photo` que hereda de `Abs_Entity` y cuyos objetos se renderizan en un rectángulo centrado sobre el suelo, tal como se muestra en la captura adjunta. El rectángulo tiene adosada una textura obtenida de la imagen que carga el método del apartado anterior. Define el método `update()` de esta clase de forma que su atributo `mTexture` se actualice a la textura de este rectángulo.



### Apartado 37 .....

*(Opcional)* Implementa el evento de teclado `F` que guarda la imagen de la foto hecha como en el apartado anterior, como fichero `.bmp`.

### **Apartado 38 .....**

Define una escena que contenga un suelo, una caja con su tapa que se abre y se cierra, situada en una esquina del suelo, una estrella encima de la caja, una cristalera que rodea el suelo, unas hierbas y una foto. Evidentemente, no es obligatorio que aparezcan los apartados opcionales.

## Entrega III Apartados del 39 al 55

Fecha de entrega: 4 de abril de 2024

### Apartado 39 .....

Añade a la clase Camera los atributos `glm::dvec3 mRight, mUpward y mFront`, más el método protegido `void setAxes()` que les da valor usando la función `row()`.

### Apartado 40 .....

Modifica aquellos métodos de la clase Camera que deban invocar el método `setAxes()` para mantener el valor de estos atributos coherentemente con cualquier cambio en la matriz de vista.

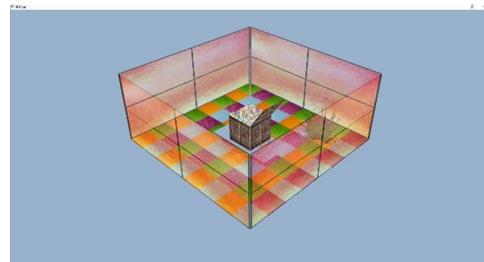
### Apartado 41 .....

Añade a la clase Camera, métodos para desplazar la cámara en cada uno de sus ejes, sin cambiar la dirección de vista:

```
void moveLR(GLdouble cs); // A izquierda/A derecha  
void moveFB(GLdouble cs); // Adelante/Atrás  
void moveUD(GLdouble cs); // Arriba/Abajo
```

### Apartado 42 .....

Añade a la clase Camera un método público `void changePrj()` para cambiar de proyección ortogonal (izquierda) a perspectiva (derecha, en las capturas de más abajo), y viceversa. El cambio de proyección está mediado por el atributo booleano `bOrtho` de la clase Camera.



### Apartado 43 .....

Modifica aquellos métodos de la clase Camera afectados por el cambio de proyección (por ejemplo, `setPM()` para que el zoom siga funcionando correctamente).

### Apartado 44 .....

Define el evento de la tecla ‘p’ para cambiar entre proyección ortogonal y perspectiva.

### Apartado 45 .....

Comenta las llamadas a los métodos `pitch()`, `yaw()` y `roll()` de las teclas especiales y prueba allí que funcionan correctamente los métodos del apartado 41, tanto con proyección ortogonal como con proyección perspectiva.

### Apartado 46 .....

Añade a la clase Camera, métodos para rotar la cámara en cada uno de sus ejes *u*, *v* y *n*:

```
void pitchReal(GLdouble cs);
void yawReal(GLdouble cs);
void rollReal(GLdouble cs);
```

Como con las traslaciones, prueba en las teclas especiales que estas rotaciones funcionan correctamente. Hay una demo en el Campus Virtual que muestra cuál debe ser el comportamiento esperado de cada una de ellas.

### Apartado 47 .....

(*Opcional*) Sitúa una cámara encima del triángulo que rota alrededor del origen (escena de la primera entrega), mirando al centro de este, y haz que la cámara lo acompañe tanto en su rotación sobre sí mismo como en su movimiento por la circunferencia. Para ello define en la clase Camera un método `update()` que hace que la cámara imite los dos movimientos del triángulo. Invoca este método dentro del método `update()` de la clase IG1App apropiadamente para que se muevan, de forma coordinada, triángulo y cámara, cuando la ejecución se encuentra en stand-by. Hay una demo en el Campus Virtual.

### Apartado 48 .....

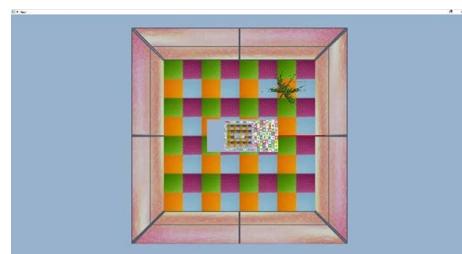
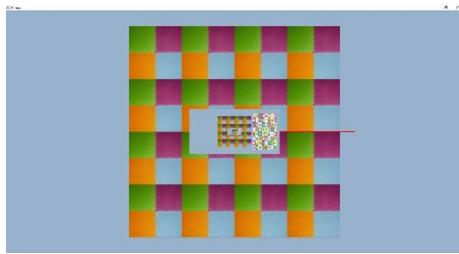
Incorpora a la clase Camera el método `orbit(incAng, incY)` para desplazar la cámara a lo largo de una circunferencia situada sobre el plano **XZ**, a una determinada altura sobre el eje Y, alrededor de `mLook`, tal como aparece definido este método en las transparencias.

### Apartado 49 .....

Modifica los métodos `set2D()` y `set3D()` de manera que se inicialicen de forma coherente los atributos de la cámara `mEye`, `mLook`, `mUp`, `mAng` y `mRadio`.

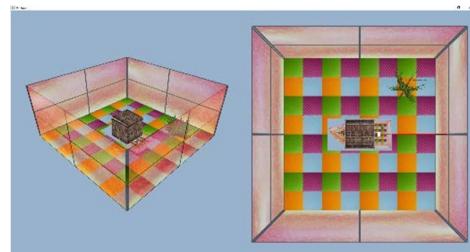
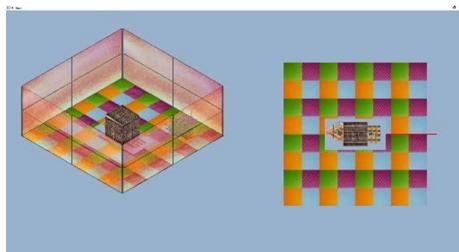
### Apartado 50 .....

Añade a la clase `Camera` un método `setCenital()` que muestra la escena desde una posición cenital. Abajo tienes dos capturas que muestran una escena cenitalmente en proyección ortogonal (izquierda) y perspectiva (derecha).



### Apartado 51 .....

Define el evento de la tecla ‘k’ para renderizar dos vistas de forma simultánea, tal como se muestra en las capturas de abajo. En cada una de ellas, a la izquierda se ve la escena con la cámara en su posición normal 3D, y a la derecha con la cámara en posición cenital. La captura de la izquierda está hecha con proyección ortogonal y la de la derecha con proyección perspectiva. Añade a la aplicación un atributo bool `m2Vistas` para mediar, en la tecla ‘k’, entre la renderización de una vista o de dos.



### Apartado 52 .....

Añade a `IG1App` dos nuevos atributos: `dvec2 mMouseCoord`, para guardar las coordenadas del ratón, e `int mMouseButt`, para guardar el botón pulsado.

### Apartado 53 .....

Programa los siguientes callbacks de `IG1App`, definidos tal como se han explicado en clase:

- `void mouse(int button, int state, int x, int y)`: captura en `mMouseCoord` las coordenadas del ratón ( $x, y$ ), y en `mMouseButt`, el botón pulsado.
- `void motion(int x, int y)`: captura las coordenadas del ratón, obtiene el desplazamiento con respecto a las anteriores coordenadas y, si el botón pulsado es el derecho, mueve la cámara en sus ejes `mRight` (horizontal) y `mUpward` (vertical) el correspondiente desplazamiento, mientras que si es el botón izquierdo, rota la cámara alrededor de la escena.
- `void mouseWheel(int n, int d, int x, int y)`: si no está pulsada ninguna tecla modificadora, desplaza la cámara en su dirección de vista (eje `mFront`), hacia delante/atrás según sea `d` positivo/negativo; si se pulsa la tecla **Ctrl**, escala la escena, de nuevo según el valor de `d`.

#### Apartado 54 .....

*(Opcional)* Renderiza dos escenas diferentes dividiendo la ventana en dos puertos de vista. En el de la izquierda se mostrará la escena 1, es decir, la de la cristalera, y en el de la derecha, la escena 0, es decir, la bidimensional de la primera entrega.

#### Apartado 55 .....

*(Opcional)* Modifica la programación de los eventos de ratón de forma que este pueda actuar independientemente en cada puerto de vista, dependiendo de en cual se encuentre el cursor. Modifica el evento de la tecla '**u**' de forma que se actualice la escena del puerto de vista que contiene el cursor del ratón. Modifica el evento de la tecla '**p**' de forma que se cambie el tipo de proyección de la escena del puerto de vista que contiene el cursor del ratón. La foto puede seguir mostrando la ventana entera.

## Entrega IV Apartados del 56 al 68

### Fecha de entrega: 25 de abril de 2024

#### Apartado 56 .....

Para introducir luz en la escena, añade el siguiente método a la clase Scene:

```
void Scene::sceneDirLight(Camera const&cam) const {
    glEnable(GL_LIGHTING);
    glEnable(GL_LIGHT0);
    glm::fvec4 posDir = { 1, 1, 1, 0 };
    glMatrixMode(GL_MODELVIEW);
    glLoadMatrixd(value_ptr(cam.viewMat()));
    glLightfv(GL_LIGHT0, GL_POSITION, value_ptr(posDir));
    glm::fvec4 ambient = { 0, 0, 0, 1 };
    glm::fvec4 diffuse = { 1, 1, 1, 1 };
    glm::fvec4 specular = { 0.5, 0.5, 0.5, 1 };
    glLightfv(GL_LIGHT0, GL_AMBIENT, value_ptr(ambient));
    glLightfv(GL_LIGHT0, GL_DIFFUSE, value_ptr(diffuse));
    glLightfv(GL_LIGHT0, GL_SPECULAR, value_ptr(specular));
}
```

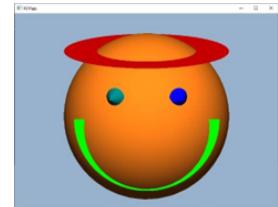
e invócalo como primera instrucción del método render() de Scene. Además hay habilitar el material con glEnable(GL\_COLOR\_MATERIAL) en Scene::setGL(); así como el correspondiente glDisable.

#### Apartado 57 .....

Añade a tu proyecto la clase QuadricEntity, que hereda de Abs\_Entity, y las clases Sphere, Cylinder, Disk y PartialDisk, que heredan de QuadricEntity, y que permiten dibujar esferas, cilindros, discos y discos parciales como entidades cuadráticas de la biblioteca GLU.

#### Apartado 58 .....

(Opcional) Crea una escena que tiene, como único objeto, la cabeza del granjero que aparece en la captura adjunta y que está formada por los siguientes elementos: el sombrero, que es un disco rojo; la barba, que es un disco parcial verde; los ojos, que son conos de distinto color, azul marino y gris marengo; y la propia cabeza, que es una esfera naranja.



## Apartado 59 .....

Crea la clase `CompoundEntity` que hereda de la clase `Abs_Entity` y que dispone de un atributo nuevo:

```
std::vector<Abs_Entity*> gObjects;
```

y de un método para añadir una entidad a este vector de la entidad compuesta:

```
void addEntity(Abs_Entity* ae);
```

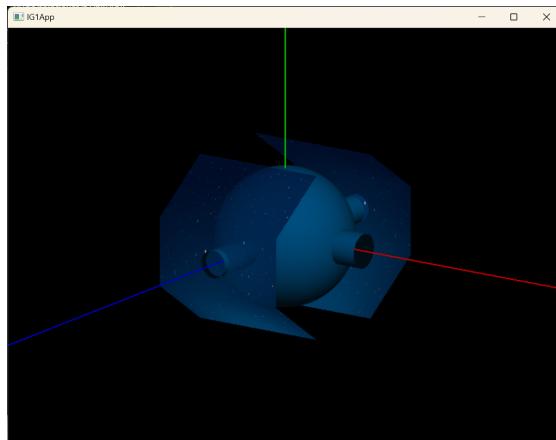
Define la destructora:

```
~CompoundEntity()
```

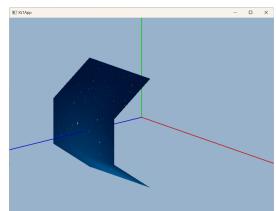
y, sobre todo, reescribe convenientemente el método `render()`.

## Apartado 60 .....

Construye el caza estelar imperial **Advanced TIE X-1**, es decir, la nave de Darth Vader. Define pues una nueva clase `AdvancedTIE` que hereda de la clase `CompoundEntity` y cuyos objetos se renderizan como la nave de la captura adjunta. El fondo negro es opcional.



Cada una de estas naves está construida como sigue: dos alas que son elementos de la nueva clase de entidad que tienes que definir `WingAdvancedTIE` y que se generan mediante un nuevo método de la clase `Mesh`, utilizando la primitiva que quieras. Las alas se renderizan con textura translúcida `noche.bmp`.



Además, tienen un eje, que es un cilindro que va de ala a ala; un núcleo central, que es una esfera cuádrica; y, por último, un morro, que es una entidad compuesta por un

cilindro y un disco cuádricos, este último tapando uno de los lados del cilindro, tal como se muestra en la imagen. El color de todos estos elementos es el añil (0, 65, 106). Debes ajustarte a esta construcción.

### Apartado 61 .....

Añade a la clase Mesh el atributo `std::vector<glm::dvec3> vNormals` para que los vértices de las mallas puedan disponer también de vector normal. Modifica el método `render()` de Mesh para que contemple el caso en que la malla tenga array de vectores normales. Comprueba que todas las mallas que tenías siguen renderizándose correctamente después de añadir normales.

### Apartado 62 .....

Define la clase `IndexMesh` que hereda de `Mesh`, añadiendo atributos para el array de índices `vIndexes` y modificando el método `draw()`, que aquí usa el comando `glDrawElements(...)`, tal como se explica en las transparencias.

### Apartado 63 .....

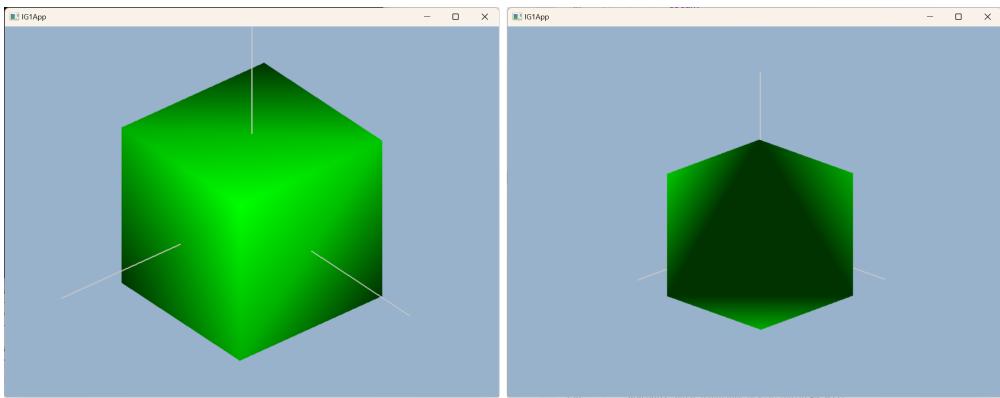
En la clase `IndexMesh` define el método:

```
static IndexMesh* generateIndexedBox(GLdouble l);
```

que construye la malla indexada de un cubo centrado en el origen de arista de longitud `l`, con tapa superior e inferior. La primitiva de esta malla es `GL_TRIANGLES`. Hay 8 vértices y el color de todos ellos será verde. Define cuidadosamente los 36 índices que, de 3 en 3, determinan las 12 caras triangulares de la malla. Recuerda que los índices de estas caras deben darse en sentido anti-horario según se mira el cubo desde su exterior.

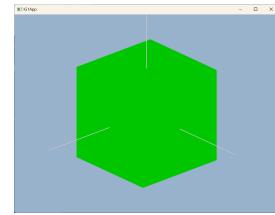
Los vectores normales puedes calcularlos a mano. Observa que el vector normal de cualquier vértice es una suma de varios vectores de los siguientes seis tipos posibles ( $\pm 1, 0, 0$ ), ( $0, \pm 1, 0$ ), ( $0, 0, \pm 1$ ). Por ejemplo, la esquina del cubo en el octante positivo del espacio es el vértice de coordenadas `dvec3(1/2, 1/2, 1/2)`. Su vector normal es el vector `glm::normalize(dvec3(1, 1, 2))` porque este vértice participa en 4 triángulos.

Las capturas adjuntas muestran la renderización de uno de estos cubos, con la luz `sceneDirLight(cam)` dada y el color material activado, por delante (a la izquierda) y por detrás (a la derecha).



#### Apartado 64 .....

Crea la clase `IndexedBox` que hereda de `Abs_Entity` y que da valor al atributo `mMesh` usando el método del apartado anterior de generación de la malla de un cubo indexado y con normales. Para comprobar la importancia de los vectores normales, renderiza el cubo sin tener en cuenta `vNormals` en `render()` y tendrás que obtener la mancha verde de la figura adjunta.



#### Apartado 65 .....

En la clase `IndexMesh` define el método:

```
void buildNormalVectors();
```

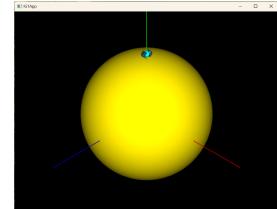
que construye los vectores normales de una malla indexada a partir de los índices de las caras, tal como se explica en las transparencias. Evidentemente, cuando utilices este método para obtener los vectores normales, la renderización del cubo debe ser la misma que la del correspondiente apartado anterior donde los vectores normales se calculaban a mano.

#### Apartado 66 .....

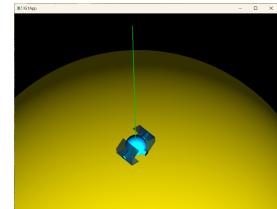
Usando la técnica del nodo ficticio (o vértice duplicado), programa de nuevo el Apartado 15, es decir, un triángulo RGB que rota sobre sí mismo en sentido horario a la vez que se mueve sobre una circunferencia de radio 300, en sentido anti-horario. Recuerda que usar esta técnica obliga a introducir algún nodo ficticio.

## Apartado 67 .....

Crea una escena sobre background negro, formada por la esfera del desértico planeta Tatooine (de color amarillo estándar (255, 233, 0)) ...



y el caza imperial de Darth Vader en su polo norte, tal como se muestra en la captura adjunta.



## Apartado 68 .....

Usando la técnica del nodo ficticio programa dos métodos en la clase Scene:

- `rotate()`: permite rotar el caza sobre sí mismo haciendo que varíe la dirección en la que apunta el morro de la nave.
- `orbit()`: permite mover el caza por el círculo máximo de la esfera que pasa por la nave, en la dirección en la que apunta el morro.

Programa eventos de teclado de forma que estos dos métodos sean invocados, respectivamente, por las teclas f/g.