**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ÁREA DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**

**SISTEMAS INTELIGENTES**

**Clave única: 291423**

**Francisco Jacob Flores Rodríguez**

**GRAFICACIÓN POR COMPUTADORA [09 – 10 AM]**

**REPORTE DE PROYECTO FINAL DEL SEMESTRE**

**“REBOTE DE BALÓN CON CURVAS DE BÉZIER”**

**OMAR RODRIGUEZ GONZÁLEZ**

**Martes, 5 de enero del 2021**

**INTRODUCCIÓN**

A lo largo de nuestra vida muy probablemente hemos visto diversas animaciones en forma de cortometrajes, películas, videos, entre otros, pero tal vez nunca nos hemos puesto a pensar en cómo se hace ese proceso. Uno de los pasos para estos procesos es el cargar archivos que contengan los objetos que se manejarán durante el proyecto. Es aquí en donde entran los archivos OBJ.

Como su nombre lo indica, el lector de OBJ leerá y guardará en memoria archivos con dicha extensión que manejen al menos vértices y caras. Las caras de un polígono están formadas por aristas, los cuales se infieren tomando en cuenta la información dada por la cara, y las aristas están formados por vértices. Además, puede haber vértices normales, vértices de textura, y más datos que son relevantes, pero en el caso del lector no tomaremos en cuenta todos estos elementos.

Todos estos datos que he mencionado están incluidos en los archivos con dicha extensión, delimitados por espacios, diagonales, o algún otro delimitador. Esto define la forma en que funciona el lector, ya que se toman en cuenta los delimitadores para cargar los datos a las instancias que a cada uno le corresponde. Es así como al tener la información cargada en memoria, se podrá dibujar al objeto en pantalla para hacer las respectivas transformaciones y desplazamientos esperados. Es por esto por lo que el lector es parte esencial del manejo de los archivos, ya que permitirán trabajar con los objetos deseados. Es evidente que hay técnicas más avanzadas para el manejo de dichos archivos, y objetos, pero este trabajo nos sirve para entender los elementos de un lector y cómo es que se manejan los archivos OBJ.

Por otro lado, estos objetos que se obtienen de dichos archivos nos funcionan para algo, pero ¿para qué? En este caso para animarlos de la forma en que lo necesitemos. Para esto se hará uso de otras técnicas importantes para el manejo de objetos, y su dibujado. Lo principal, y más importante en este caso, son las transformaciones.

Una transformación permite al objeto cambiar aspectos respecto a su posición, tamaño, y su movimiento en general. Hay 3 tipos de transformación: rotación, traslación, y escala. Estas transformaciones son primordiales a la hora de hacer alguna animación o trabajar con la composición de los objetos, que en este caso son en 3 dimensiones. Pero para esto se hace uso de otra herramienta muy importante: las curvas de Bézier, las cuales nos ayudarán a trasladar el objeto de un punto a otro con curvas, pero de forma sutil.

Ahora bien, el objetivo de este proyecto será hacer uso de las herramientas que se han mencionado. Específicamente, se hará una animación de rebote de un balón tomando un archivo OBJ que contenga la información del balón. Para esta animación se realizarán distintas transformaciones, y se hará uso de las curvas de Bézier. Esto ayudará a mejorar el nivel de comprensión sobre las problemáticas que engloban este tipo de proyectos, y actividades. Así, en lugar de utilizar herramientas que hacen todo esto sin que sepamos qué es lo que sucede, podremos comprender con mayor profundidad cuáles son los procesos detrás del manejo y ejecución de este tipo de trabajos.

**DESARROLLO**

Para la realización del proyecto, y el cumplimiento de los objetivos establecidos, es necesaria la comprensión de diversos aspectos que serían útiles para lo mencionado. Entre estos se encuentran:

* El lenguaje de programación que fue utilizado, que en este caso C++.
* Las bibliotecas y headers que se utilizaron.
* La plataforma o sistema operativo para el cuál será realizado el programa. En este caso una distribución de GNU/Linux, Xubuntu.
* Software de control de versiones. En este caso utilicé Git para llevar un control de lo que hice a lo largo del tiempo con el proyecto.
* Archivos OBJ. ¿Qué son, para qué sirven, y cómo se manejan?
* Transformaciones: rotación, traslación, y escala.
* Curvas de Bézier.
* Manejo de cámaras.

Habiendo establecido las herramientas utilizadas para la realización del proyecto, y su manejo, hay que definir o indicar cómo se utilizaron, por lo cual, sería mejor conocer de lo más general a lo más concreto.

**LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN: C++**

En esta ocasión, hicimos uso de C++ como lenguaje para programar. Cabe indicar que nunca había trabajado tan a fondo con este lenguaje. Lo más complicado que había hecho para el momento en el que comenzamos con el proyecto fue probablemente el mítico “Hello, world”, y eso sin entender bien la estructura básica del lenguaje. Esto, evidentemente supuso una problemática para mí, ya que tendría que entender las bases e ir aprendiendo sobre la marcha. Aún así, me supuso un reto el tener que aprenderlo mientras iba desarrollando el proyecto, y utilizándolo de una forma algo más compleja.

Cabe agregar que no estuve solo en el proceso de aprendizaje, sino que el profesor nos guio con distintos procedimientos, lo cual ayudó a que el proceso fuera más rápido y digerible. Y así fui aprendiendo, haciendo uso además de los conceptos que ya conocía de la programación, por lo cual, me facilitó mucho su entendimiento. Si bien, en algunos aspectos se maneja una sintaxis distinta a otros lenguajes que había generado con anterioridad, hay muchas palabras reservadas que se comparten con dichos lenguajes.

***Bibliotecas utilizadas***

Aquí es donde entran las bibliotecas (no librerías) que se utilizaron para lograr lo cometido, las cuales fueron diversas. Es por esto por lo que no está de más definir para qué sirve cada una de las bibliotecas. Además, se hizo uso de bibliotecas que no se escuchan mucho, las cuales será esencial su entendimiento para la comprensión del proyecto, y el código específicamente.

A continuación, estarán listados los headers de las bibliotecas y para qué son de acuerdo con <http://www.cplusplus.com/>.

1. **<iostream>: Biblioteca de Streams de Entrada / Salida Estándar (Standard Input / Output Streams Library):** Header que define los objetos stream estándar de entrada/salida.

* **C++98:** Incluir el header podría incluir automáticamente otros header, tales como <ios>, <streambuf>, <istream>, <ostream> y/o <iosfwd>.
* **C++11:** Incluir el header también incluirá de forma automática <ios>, <streambuf>, <istream>, <ostream> y <iosfwd>.

1. **<string>:** Header que introduce tipos string, rasgos de carácter y un conjunto de funciones de conversión.
2. **<vector>:** Header que define la clase que contiene vector.
3. **<fstream> Streams de archivo (File streams):** Header que contiene las clases de stream de archivos.
4. **<armadillo>:** Es una biblioteca para álgebra linear y computación científica.

En nuestro caso tuvimos que instalar la biblioteca mediante la terminal de Xubuntu.

* **Instalación: sudo apt-get install libarmadillo-dev**

1. **<cmath> (math.h) Biblioteca numérica C (C numerics library):** Header que declara un conjunto de funciones para computar operaciones matemáticas comunes, y transformaciones.
2. **<random>:** Introduce facilidades para la generación de números aleatorios.
3. **<cstdlib> (stdlib.h) Biblioteca de Utilidades Generales Estándar C (C Standard General Utilities Library):** Define muchas funciones de propósito general, incluyendo manejo dinámico de memoria, generación de números aleatorios, comunicación con el entorno, aritméticas de enteros, búsqueda, ordenación, y conversión. Específicamente la utilicé para inicializar un generador de números aleatorios con srand().
4. **<ctime> (time.h) Biblioteca de Tiempo de C (C Time Library):** Incluye definiciones de funciones para obtener y manipular información de la fecha y tiempo. Específicamente utilicé la función time() para obtener la hora actual e inicializar el generador de números aleatorios con srand().

***OpenGL***

Para las siguientes bibliotecas primero hay que entender qué es OpenGL, por lo que será definido a continuación junto a su uso.

Como se menciona en el sitio web de OpenGL (<https://www.opengl.org/about/>) es el estándar de gráficos que más ha sido adoptado. Es el entorno principal para desarrollar aplicaciones de gráficos 2D y 3D portátiles interactivos. Desde su introducción en 1992, se ha convertido en la API (Application Programming Interface) de gráficos más utilizada en la industria. OpenGL incorpora un amplio conjunto de poderosas funciones de visualización, tales como: renderizado, mapeado de texturas, efectos especiales, entre otras.

Algunas de sus ventajas son:

* Es el estándar de la industria.
* Es estable.
* Es confiable y portable.
* Sigue evolucionando.
* Es escalable.
* Es fácil de usar.
* Está muy bien documentado.

Habiendo comprendido en grandes términos lo que es OpenGL podemos inferir que es la herramienta con la que se hace el dibujado de los objetos 3D que se obtienen de los archivos OBJ. Después de obtener los datos del objeto a partir del archivo (lo cual se explicará más adelante) se hace uso de las funciones definidas en las bibliotecas de OpenGL en C++. Permite dibujar por triángulos o polígonos (en el caso del objeto que utilicé fue con cuadros) especificando su color, entre otros parámetros. Además, permite su visualización, así como cambiar la perspectiva desde donde vemos los gráficos que manejamos, como otras funciones más complejas.

Después de esta breve explicación, ahora sí podemos explicar qué contiene cada uno de los siguientes headers de OpenGL.

1. **<GL/glu.h>** **GLU - Utilidades GL (GL Utilities):** Se refieren a un conjunto de funciones de utilidad que hacen que algunas de las operaciones de OpenGL más fácil de programar. Es un estándar en todas las implementaciones de OpenGL, y es generalmente pensado como una parte del estándar OpenGL.
2. **<GLFW/glfw3.h>:** Es el header de la API de GLFW 3. Define todos sus tipos y declara todas sus funciones.

* **Instalación**
  + sudo apt-get install libglfw3-dev
  + sudo apt-get install libglew-dev

Habiendo definido todas los headers que se utilizaron en la realización del proyecto se logra una mayor comprensión de para qué son útiles en el proyecto. Es verdad que no le resta complejidad, pero así se facilita el proceso de comprensión.

**SISTEMA OPERATIVO EN QUE SE TRABAJÓ**

Para la ejecución del proyecto trabajamos en una distribución de GNU/Linux: Xubntu. Es un sistema operativo basado en Ubuntu, con la ventaja de que es más ligero. Aunque sea una distribución distinta, trabaja de la misma manera que otras distribuciones en cuanto al manejo de la terminal para compilar y ejecutar código.

Para compilar el código se trabajó con un Makefile, que compila todos los archivos de las carpetas que se indiquen de forma automática (aunque tardada porque cada vez que se ejecuta compila todo de nuevo). Después de esto simplemente se ejecutaba el programa principal (main), que tiene la extensión “.o”. Esta extensión, según la respuesta de *community wiki* en <https://askubuntu.com/questions/156392/what-is-the-equivalent-of-an-exe-file>, es equivalente a la extensión “.dll” en Windows e indica un objeto que puede ser cargado en tiempo de ejecución.

***¿Cómo utilizar el Makefile?***

En la terminal, habiendo accedido al directorio en donde se encuentra todo lo necesario para que el programa funcione, ejecutar el comando “***make***”, el cual compilará todos los archivos que se indiquen. En mi caso modifiqué el código original del Makefile, ya que trabajé con archivos en distintas carpetas.

***¿Cómo ejecutar el programa?***

Para ejecutar el programa simplemente hay que escribir en la terminal “***./main***”.

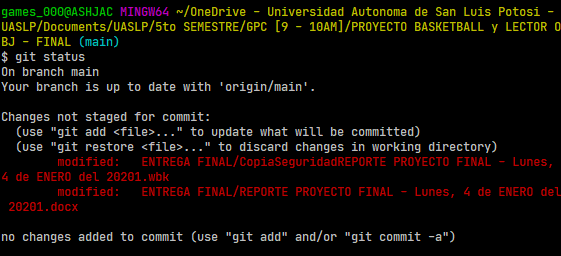
**SOFTWARE DE CONTROL DE VERSIONES: GIT**

Para llevar un control del trabajo que hice a lo largo del lapso que se nos dio para realizar el proyecto utilicé un software de control de versiones (que en este momento es el único que he utilizado) llamado Git. Git nos permite llevar cuenta del historial de los cambios que hayamos hecho, cuándo subimos estos cambios, qué agregamos, qué quitamos, volver a versiones anteriores, entre muchas más funciones. Es por esto por lo que me pareció factible, ya que fue un proyecto que tomó varios meses finalizarlo, y borrar cosas que ya no necesitaba en el momento, o hacer cambios grandes sin llevar este control de cambios me parece que es fácil cometer un error que lleve a más y más fallos para después terminar confundido por ya no saber qué está sucediendo.

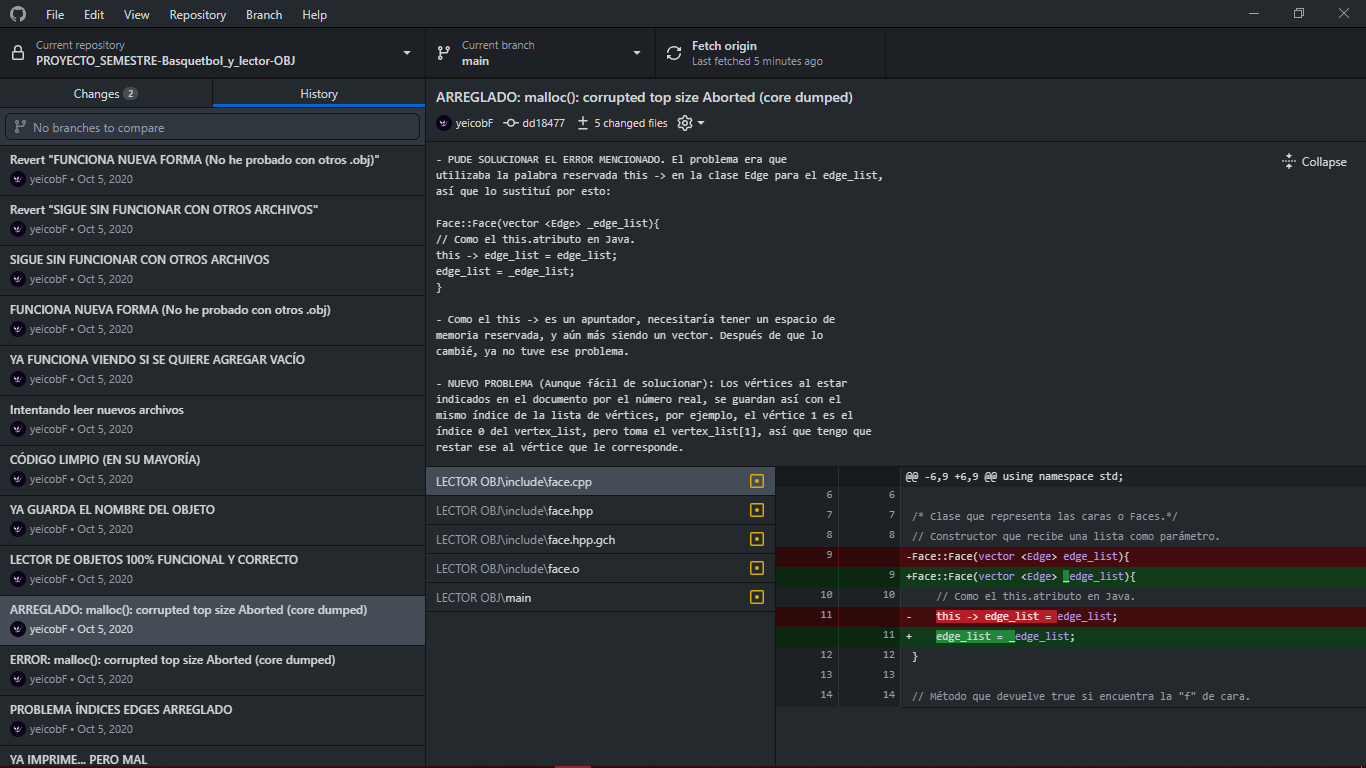
Además, en lo personal me gusta saber qué hice, qué errores encontré, cómo solucioné dichos errores, y más, por lo que es una herramienta que me viene muy bien. Estos cambios se quedan guardados en el servidor remoto en el repositorio que hayas creado en <https://github.com/>, pero los tienes que subir tú para que se vean reflejados.

Git como tal es el software que maneja todo lo mencionado, pero para hacer uso de él hay varias maneras, y las que utilicé fueron 2:

* **Git Bash:** Es un intérprete de comandos, en donde tienes todas las opciones disponibles de Git (que hayas instalado), por lo cual tienes una gran libertad para hacer uso de las herramientas de forma manual, logrando resultados más precisos con lo que quieras hacer.



* **GitHub Desktop:** Es una interfaz gráfica de usuario que hace uso de Git, pero de forma mucho más sencilla pero más limitada al mismo tiempo. No tienes tantas opciones disponibles como haciendo uso de los comandos de manera directa. Aún así, es muy útil cuando no requieres de operaciones más complejas que subir y revisar los cambios que hayas realizado.



Haciendo uso de estas herramientas no solo me ayudó a guardar el programa e incluso trabajarlo desde otra computadora, sino que me ayudó a cuantificar y comprender con mayor facilidad los errores que cometía. Esto se debe a que en la mayoría de los cambios (en git se les llama commits al contenido que se va subiendo) escribía un resumen de los errores que me había encontrado y de cosas que me faltaban por agregar o revisar, así que al relatarlo me daba cuenta de lo que debía modificar y demás. Es cierto que rara vez volví a leer los escritos que hacía, pero aún así me pueden ser útiles en un futuro para saber cómo resolver ciertas problemáticas que algún día me encontré, o simplemente saber qué hice en cierto tramo del tiempo.



**LECTOR DE ARCHIVOS OBJ**

Entrando en materia en cuanto al desarrollo específico del proyecto y el funcionamiento del programa, no podemos dejar atrás al lector de archivos OBJ. Como bien indica el mismo nombre, su utilidad es recorrer todo un archivo OBJ y obtener sus datos para después guardarlo en memoria. Los datos que guarda mi lector son:

* Vértices con sus coordenadas (x, y, z).
* Los vértices que componen cada cara.
* Además, las aristas que unen a las caras se infieren a partir de los datos que se dan.

Eso es en rasgos generales. El problema con el lector es que si la fila que contiene los datos de las caras tiene espacios al final (después de los últimos datos), se empiezan a guardar los datos de forma errónea. Pero mientras no existan dichosos espacios al final de las filas mencionadas no hay problema. Probé con objetos de 3 y 4 aristas por cara y los lee de forma correcta mientras se respete lo dicho.

***Explicación de un archivo obj***

Ahora bien, los archivos OBJ tienen una estructura específica que indica cómo se maneja cada elemento del objeto, lo cual fue útil para la comprensión de estos y la realización del lector en sí. Es de esta forma como se logra el dibujado del objeto en 3D utilizando OpenGL, y su posterior manipulación.

Un archivo OBJ está organizado de diversas maneras, pero todas siguiendo una nomenclatura ya establecida, aunque a nosotros solo nos importan algunas para el proyecto. Estas van indicadas en cada línea por letras que definen cada tipo de datos:

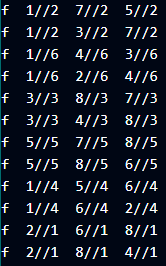
* **o:** Nombre del objeto



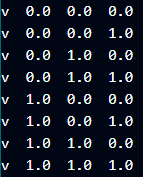
* **g:** Nombre del grupo (también lo tomamos como nombre del objeto en el proyecto).



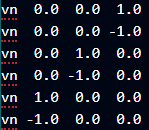
* **f:** Una cara del objeto.



* **v:** Un vértice con sus coordenadas (x, y, z, w (opcional)).



* **vn:** vértice normal.



**TRANSFORMACIONES**

Ya se ha definido la primera parte del proyecto, pero aún queda lo que logrará que se cumpla el propósito del proyecto: el movimiento de nuestro objeto. Pero ¿cómo es que se logra esto? No es trivial, ya que requiere del entendimiento y manejo de un concepto muy importante, técnicamente primordial, junto a sus cálculos y procedimientos. Este concepto se conoce como “***transformaciones***”.

Según la información contenida en el sitio web <http://prepa8.unam.mx/academia/colegios/matematicas/paginacolmate/applets/matematicas_VI_4/Applets_Geogebra/transfgeom.html>, “las transformaciones geométricas son las operaciones que permiten crear una nueva figura *homóloga*, a partir de una previamente dada”. Es decir, podemos modificar una figura que en este caso sería el objeto obtenido del archivo OBJ, para cambiar su composición geométrica.

En nuestro caso hicimos uso de 3 tipos de transformaciones geométricas básicas:

1. **Traslación:** Permite cambiar la posición de la figura. Se mueve el objeto.
2. **Escalación:** Permite cambiar el tamaño de la figura de acuerdo con una escala. Se puede hacer más grande o chica.
3. **Rotación:** Permite girar la figura.

Haciendo uso de las transformaciones básicas se crea una transformación compuesta. Estas transformaciones harán que el objeto presente movimiento y cambios en su estado (geométricamente hablando). Es así que nos acercamos cada vez más al entendimiento de cómo lograr el objetivo: simular los rebotes de un balón.

***Curvas de Bézier***

Ahora bien, ya sabemos que podemos mover el objeto, cambiarlo de tamaño, e incluso rotarlo, pero surge otra pregunta: ¿cómo sabemos hacia dónde moverlo, y cómo hacemos que tenga una trayectoria curva? Y es aquí en donde está la importancia de las curvas de Bézier.

Las curvas de Bézier generan trayectorias que nos permiten que el objeto tenga un movimiento suave al tratarse de curvas, valga la redundancia. Estas se calculan haciendo uso de un punto inicial, dos puntos de control intermedios, y un punto final. Haciendo uso de dichos parámetros además de una matriz de Bézier, se calculan diversos puntos a lo largo de la trayectoria que se quiere seguir, para luego trasladar al objeto en cada uno de los puntos calculados. Entre más puntos, mayor suavidad habrá al mover al objeto.

**ORGANIZACIÓN DEL PROGRAMA / PROYECTO – CARPETAS Y ARCHIVOS**

**EXPLICACIÓN DE CLASES Y MÉTODOS**

***Diagrama de clases***

***Clases***

Explicaré los métodos de cada clase a grandes rasgos.

* ***Lector de archivos OBJ***
  + ***Face***
  + ***Edge***
  + ***Vertex***
  + ***Object***
* ***Gráficos***
  + ***BezierCurves***
  + ***GraphicObject***
  + ***Transform***

**ESTRUCTURAS DE DATOS UTILIZADAS**

Cómo maneje los datos en vectores, y así.

**REBOTES Y CÁLCULOS PARA SU MOVIMIENTO**

¿Cómo simulé los rebotes en el balón?

**DIAGRAMA DE CLASES**

**Imagen que contiene Texto

Descripción generada automáticamente**

**\* DIAGRAMA HECHO EN: lucidchart (lucid.app)**

En el diagrama de clases se muestran las 4 clases que hasta ahora se manejarán para la realización del programa. Las flechas que se ven en el diagrama son un tipo de Aggregation, específicamente Composition. Esta indica que el hijo no puede existir independientemente del padre. En este caso la generalización es el Objecto, pero como no manejé herencia, esta es la forma en la que supe representar la relación que hay entre las clases, pero probablemente esté incorrecto.

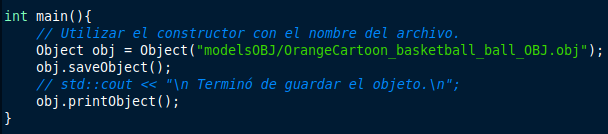
**CLASES:**

* **Object:** Es la clase que manejará al objeto con todos sus elementos, es decir, sus caras, aristas, y vértices.
* **Face:** Esta clase manejará las caras del objeto y guardará las aristas que forman las caras.
* **Edge:** Esta clase manejará las aristas del objeto. Guardará los números de vértice de las aristas y sus vértices como tal.
* **Vertex:** Esta clase manejará los vértices, es decir, sus coordenadas.

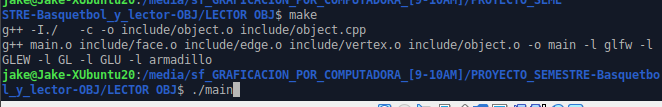
**Estructuras de datos usadas:**

* **Vector:** Un vector es una estructura de datos similar a los arreglos. A diferencia de los arreglos, tienen la capacidad de crecer o decrecer dinámicamente. También es algo parecida a una lista por esta última característica mencionada. Se utiliza para guardar la lista de caras, de vectores y de vértices.

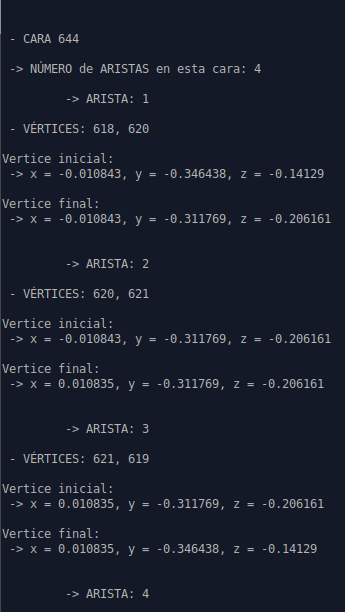
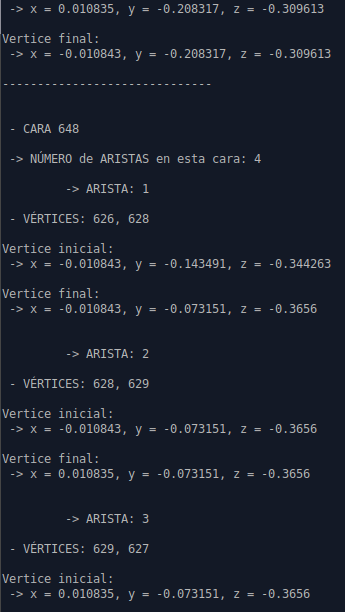
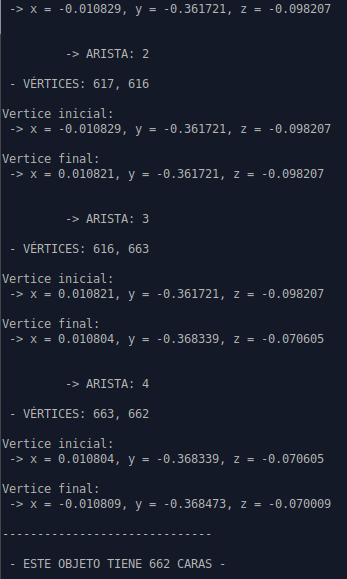
**PRUEBAS**



Para comenzar con las pruebas primero debemos indicar la carpeta en donde se encuentra el archivo OBJ y el nombre del archivo. Es así como se guardará en memoria y se podrá manipular.



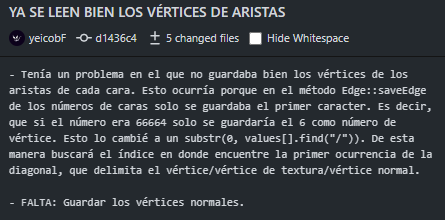
En las siguientes imágenes se encuentra la prueba que hice con el archivo OBJ que utilizaré para realizar el proyecto. Después de guardar la información con Object::saveObject(), la muestra con el método de impresión. De esta forma sabemos que se guardaron los datos de forma correcta. Específicamente se muestran el número de cara, el total de aristas, y los vértices que forman a cada arista.

**PROBLEMAS ENCONTRADOS Y EXPERIMENTOS**

A lo largo de la realización del lector me encontré con diversos problemas, entre ellos el que no funciona con todos los archivos OBJ. Esto me hizo optar a hacer un repositorio en Git para mantener un control de los cambios que he realizado y los problemas con los que me he encontrado.

* **No guardaba correctamente los números de vértices de las aristas. Esto ocurría porque en el método que realizaba estas operaciones solamente se guardaba el primer carácter de la subcadena del vértice. Lo solucioné cambiando la implementación a cuando encontrara la ocurrencia de la diagonal.**



* **Si al final de una fila de datos hay un espacio, este genera problemas.**
* **Problemas con la impresión, ya que se guarda la "f" de las caras en el vector de values (el cual es de tipo string). Esto lo solucioné poniendo el valor que no se debía ingresar en cada caso (en este caso la f), así no la agregaría al vector y solo agregaría los valores.**
* **Al correr el programa, cuando entra a hacer el setVertexNums(); lanza este error:**

**malloc(): corrupted top size**

**Aborted (core dumped)**

**El problema era que utilizaba la palabra reservada this -> en la clase Edge para el edge\_list,**

**así que lo sustituí por esto:**

**Face::Face(vector <Edge> \_edge\_list){**

**// Como el this.atributo en Java.**

**// this -> edge\_list = edge\_list;**

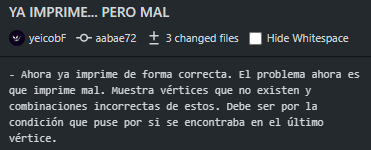
**edge\_list = \_edge\_list; }**

**- Como el this -> es un apuntador, necesitaría tener un espacio de**

**memoria reservada, y aún más siendo un vector. Después de que lo**

**cambié, ya no tuve ese problema.**

* **Adjunto una captura de pantalla de algunos errores con los que me encontré (no son muy específicos en el título, pero sí en la descripción):**



**REFERENCIAS**

1. James D. Foley, Andries van Dam, Steven K. Feiner, and John F. Hughes, Computer Graphics: Principles and Practice, ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, 1990
2. M. Pérez, “¿Cuáles son las Partes de un Informe/Reporte?”. <https://www.lifeder.com/partes-informe/#:%7E:text=Las%20partes%20de%20un%20informe%20o%20reporte%20m%C3%A1s%20destacadas%20son,incluir%20anexos%20y%20p%C3%A1ginas%20preliminares.&text=Los%20hechos%20expuestos%20en%20un,realizado%20previamente%20por%20el%20autor>, 2020
3. “Modelos de 3D Gratis”. <https://www.turbosquid.com/es/Search/3D-Models/free>, (s. f.)
4. D. Chakravorty, “The Most Common 3D File Formats”. <https://all3dp.com/3d-file-format-3d-files-3d-printer-3d-cad-vrml-stl-obj/#:%7E:text=We%20simply%20explain%20the%20most,OBJ%2C%20FBX%2C%20COLLADA%20etc>, 2020
5. “2. Linear interpolation”. <https://en.khanacademy.org/computing/pixar/animate/ball/v/a2-quick>, (s. f.)
6. “3. Bezier curves”. <https://en.khanacademy.org/computing/pixar/animate/ball/v/animation3>, (s. f)
7. M. Winter, “How to change background color of an OpenGL surface?”. <https://stackoverflow.com/questions/53535984/how-to-change-background-color-of-an-opengl-surface>, 2018
8. P., “Hello world: drawing a square in OpenGL”. <http://www.dgp.toronto.edu/~ah/csc418/fall_2001/tut/square>, (s. f.)
9. A. González, “Clase Lista C++ Estándar”. <http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo326/list.pdf>, 2001
10. J. W., “Declaring vectors in a C++ header file”. <https://stackoverflow.com/questions/4230345/declaring-vectors-in-a-c-header-file>, 2010
11. saghi, “.cpp and .hpp”. <https://www.sololearn.com/Discuss/1644964/cpp-and-hpp>, 2019
12. Alex, “11.11 — Class code and header files”. <https://www.learncpp.com/cpp-tutorial/class-code-and-header-files/>, 2007
13. “C++ Files”. <https://www.w3schools.com/cpp/cpp_files.asp>, (s. f.)
14. Sayan Mahapatra, “Why “using namespace std” is considered bad practice”. <https://www.geeksforgeeks.org/using-namespace-std-considered-bad-practice/#:~:text=The%20statement%20using%20namespace%20std%20is%20generally%20considered%20bad%20practice.&text=In%20the%20worst%20case%2C%20the,to%20resolve%20identifier%20name%20conflicts>., 2020
15. “C++ String to float/double and vice-versa”. <https://www.programiz.com/cpp-programming/string-float-conversion#:~:text=help%20of%20examples.-,C%2B%2B%20string%20to%20float%20and%20double%20Conversion,convert%20string%20to%20long%20double%20>., (s. f.)
16. “Initialize a vector in C++ (5 different ways)”. <https://www.geeksforgeeks.org/initialize-a-vector-in-cpp-different-ways/>, 2020
17. “Passing vector to a function in C++”. <https://www.geeksforgeeks.org/passing-vector-function-cpp/>, 2017
18. pp\_pankaj, “Difference Between Vector and List”. <https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-vector-and-list/>, 2020
19. “C++ sin()”. <https://www.programiz.com/cpp-programming/library-function/cmath/sin>, (s. f.)
20. “Naming conventions”. <https://manual.gromacs.org/documentation/5.1-current/dev-manual/naming.html>, (s. f.)
21. “<iostream>”. <http://www.cplusplus.com/reference/iostream/>, (s. f)
22. Nitin Sharma, “Difference between Header file and Library”. <https://www.tutorialspoint.com/difference-between-header-file-and-library>, 2020
23. “<string>”. <http://www.cplusplus.com/reference/string/>, (s. f)
24. “<vector>”. <http://www.cplusplus.com/reference/vector/>, (s. f)
25. “<fstream>”. <http://www.cplusplus.com/reference/fstream/?kw=%3Cfstream%3E>, (s. f.)
26. “Armadillo”. <http://arma.sourceforge.net/>, (s. f.)
27. “<cmath> (math.h)”. <http://cplusplus.com/reference/cmath/?kw=cmath>, (s. f.)
28. "OpenGL". <http://www.cs.tufts.edu/research/graphics/resources/OpenGL/OpenGL.htm>, (s. f.)
29. "OpenGL Overview". <https://www.opengl.org/about/>, (s. f.)
30. Marcus Geelnard, Camila Löwy, "glfw3.h". <https://www.glfw.org/docs/3.3.2/glfw3_8h_source.html>, 2020
31. "glfw3.h File Reference". <https://www.glfw.org/docs/3.3.2/glfw3_8h.html>, 2020
32. "<random>". <https://www.cplusplus.com/reference/random/?kw=%3Crandom%3E>, (s. f.)
33. "<cstdlib> (stdlib.h)". <https://www.cplusplus.com/reference/cstdlib/?kw=%3Ccstdlib%3E>, (s. f.)
34. user54905, "What is the equivalent of an “exe file”?". <https://askubuntu.com/questions/156392/what-is-the-equivalent-of-an-exe-file>, 2012
35. "Transformaciones Geométricas". <http://prepa8.unam.mx/academia/colegios/matematicas/paginacolmate/applets/matematicas_VI_4/Applets_Geogebra/transfgeom.html>, (s. f.)