

Algoritmos de Iluminación Dinámica para Video-Juegos

Autor: Yoander Cabrera Díaz

Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba, ycabrerad@uci.cu

Co-Autor: Ronaldo Castro Milán

Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba, rcastro@uci.cu

Mentor: MSc. Omar Correa Madrigal

Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba, ocorrea@uci.cu

RESUMEN

Debido a la carencia de sensación de realismo en las escenas¹ de los video-juegos que desarrolla el Grupo de Proyectos de Juegos Virtuales (GPJV) de la Facultad 5 (F5) de la Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI), así como la calidad en su visualización, se ha realizado un estudio de las técnicas modernas de iluminación local y sombreados poligonales utilizados en la actualidad para la creación de juegos 3D, con el fin de lograr escenas tridimensionales realistas con un elevado número de polígonos en los video-juegos que se desarrollan.

Dado a la complejidad del tema investigado, el mismo se resume en caracterizar, expresar matemáticamente e implementar un algoritmo de iluminación y un sombreado poligonal que satisfagan las necesidades de los video-juegos.

Palabras Clave: *shaders*², iluminación, video-juegos, tiempo real, pre-procesamiento.

ABSTRACT

Due to the lack of realism and visualization quality in scenes developed by the Virtual Games Project Group, faculty 5 at University of Informatics Sciences is necessary to study modern techniques of local lighting and polygonal shading used for creating 3D games aiming to reach realistic 3D scenes with high amount of polygons.

Given the complexity of the topic, this work pretends characterize, show mathematically and implement a local lighting algorithm and a polygonal shade model focused on video-game's needs.

¹ Cualquier espacio gráfico tridimensional generado por un ordenador.

² Fragmento de código escrito en un lenguaje gráfico específico que se ejecuta en una plataforma programable a nivel de hardware, para procesar tanto píxeles (píxel shader) como vértices (vertex shader) y sustituyen etapas del pipeline gráfico.

Keywords: shaders, lighting, video-games, real time, preprocessing.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de iluminación en Informática Gráfica, se hace referencia al proceso que permite averiguar la intensidad luminosa de cada uno de los puntos de una superficie, basados en la posición, orientación, características de la superficie y fuentes de luz incidentes. Para obtener esta intensidad luminosa se utilizan los denominados modelos de iluminación.

Actualmente el GPJV tiene **problemas** en:

- La generación de iluminación en las escenas virtuales, dado que este proceso es realizado mediante *lightmaps* que genera el Q3radiant en etapa de pre-procesamiento.
- La aplicación de luces para tiempo real es creada con OpenGL ejecutándose sobre software, lo cual no es efectivo a la hora de crear grandes aplicaciones que demanden velocidad y calidad en el procesamiento de imágenes en tiempo real.
- Las escenas que se cargan en pre-procesamiento no quedan con la calidad visual y realismo suficiente, ni se realizan en tiempos aceptables.

A raíz de lo anterior, el **problema científico** se centra en ¿Cómo mejorar la calidad de visualización en las escenas de los video-juegos para ofrecer mayor sensación de realismo, velocidad y nivel de inmersión del jugador mediante la modelación computacional de algoritmos de iluminación que se ejecuten a nivel de hardware?

Como **objetivo de la investigación** se propone aplicar algoritmos de iluminación para generar escenas en pre-procesamiento y en tiempo real con calidad visual y realismo suficiente.

2. DESARROLLO

2.1. MODELOS DE ILUMINACIÓN LOCAL

Los modelos de iluminación, también llamados de alumbrado se utilizan para calcular el color o intensidad de la luz que se percibe desde un punto determinado en la superficie de un objeto (Alcaraz, 2006). Son métodos simplificados que se basan en las propiedades ópticas de las superficies, las condiciones de la luz ambiente o de fondo, y las características de las fuentes de luz (López, Crespo and Hernando).

La figura siguiente muestra las variables vectoriales principales que dan origen a dichas componentes. L (vector de incidencia de la luz), N (vector normal a la superficie), R (vector de reflexión) y V (vector del observador) (Triana and Cuevas, 2000). Véase la figura 1

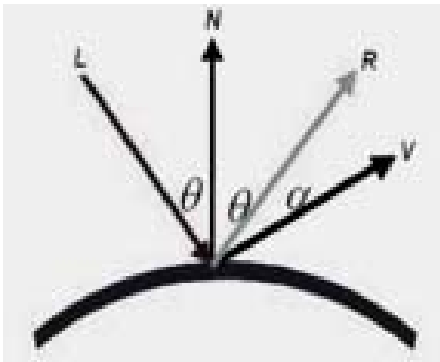


Fig. 1: Variables vectoriales del modelo de iluminación (Triana and Cuevas, 2000)

2.1.1. COMPONENTE AMBIENTAL

La luz ambiente no presenta características de espacio ni de dirección. La cantidad de luz incidente para cada objeto es constante para todas las superficies y en todas las direcciones. Es modelada mediante una constante de reflexión ambiental $K_a \in [0..1]$, dependiente del material asociado a la superficie a iluminar, y que por lo tanto permite modificar la intensidad de luz ambiente para cada superficie en cada primario. Así, la intensidad ambiental resultante I_{amb} estará dada por la expresión (1):

$$I_{amb} = I_a K_a \quad (1)$$

dónde:

I_a es la intensidad de luz ambiente en cada primario (Alcaraz, 2006).

2.1.2. COMPONENTE DIFUSA

Las reflexiones difusas son constantes en cada superficie de una escena e independientes de la dirección de vista. La cantidad fraccional de luz incidente que se refleja de manera difusa se puede establecer para cada superficie con el parámetro K_d , coeficiente de reflexión difuso. A este parámetro se le

asigna un valor constante de 0 a 1, de acuerdo con las propiedades de reflexión que se quiera dar a la superficie. Un valor próximo a 1 indicará una superficie muy reflectante, mientras que para simular una superficie que absorba la mayor parte de la luz incidente, se establecerá un valor cercano a 0 (Alcaraz, 2006).

Esta componente simula el resultado de aplicar una fuente de iluminación puntual de cierta intensidad, que es reflejada de manera uniforme (difusa) por la superficie del objeto. Pero la intensidad de la luz reflejada depende de qué tan grande sea la componente del vector normal de la superficie N en la dirección de la fuente de luz puntual, es decir, de qué tan parecidos sean el vector normal a la superficie del objeto en un punto determinado y el vector que representa la ubicación de la fuente de luz L en el espacio de coordenadas de la escena (Triana and Cuevas, 2000).

Esto hace que los polígonos de un objeto que se encuentren expuestos más directamente a la fuente de luz se vean más brillantes que los que reciben la iluminación de una manera más sesgada (Triana and Cuevas, 2000).

La ecuación para la componente difusa se puede expresar como (2):

$$I_{dif} = I_p K_d \cos \alpha \quad (2)$$

dónde:

I_p es la intensidad de la fuente de luz puntual y $\alpha \in [0^\circ..90^\circ]$ ángulo de incidencia de la luz, se observa que la componente difusa, depende del ángulo de incidencia entre N y L . Véase la figura 2

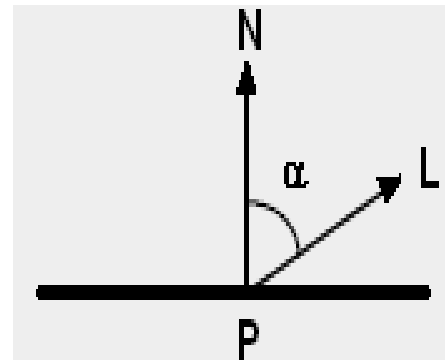


Fig. 2: Ángulo de incidencia de la luz (Triana and Cuevas, 2000)

Si N es el vector normal unitario para una superficie, como se puede apreciar en la figura anterior, y L el vector de dirección unitario para la fuente de luz, entonces $\cos \alpha = N \cdot L$, y la ecuación anterior se puede expresar como (3):

$$I_{dif} = I_p K_d (N \cdot L) \quad (3)$$

Para obtener un ambiente más realista se añade una fuente de luz ambiental a la ecuación de la componente difusa, a fin de obtener una expresión difusa total (4):

$$I_{dif} = I_a K_a + I_p K_d (N \cdot L) \quad (4)$$

A medida que el ángulo entre los vectores N y L se hace más pequeño, su producto punto se acerca a uno, la componente difusa se hace más grande, y el efecto de la iluminación puntual más notorio, pues las intensidades de los polígonos que conforman un objeto varían más drásticamente según el cambio de su vector normal (Belmonte).

Atenuación de la Fuente Luminosa

Considerando el modelo anterior con atenuación del foco hay que tener en cuenta la distancia del foco al punto iluminado d_L .

dónde:

f_{aat} es la inversa al cuadrado de la distancia que viaja desde la fuente de luz a la superficie (5).

$$f_{aat} = \frac{1}{d_L^2} \quad (5)$$

Se utiliza una función de atenuación con la distancia al foco. (Polinomio de segundo grado cuyos coeficientes se ajustan empíricamente) (6).

$$f_{aat} = \min \left[\left(\frac{1}{c_1 + c_2 \cdot d_L + c_3 \cdot d_L^2} \right), 1 \right] \quad (6)$$

dónde:

c_1 , c_2 , c_3 son coeficientes de atenuación constante, lineal y cuadrático respectivamente dependientes de la fuente, d_L es la distancia a la fuente puntual y f_{aat} la función de atenuación $\in [0..1]$ (Belmonte).

La componente difusa con atenuación del foco quedaría (7):

$$I_{dif} = I_a K_a + f_{aat} I_p K_d (N \cdot L) \quad (7)$$

Luces y superficies coloreadas

Hasta ahora todo era monocromático. El color difuso de un objeto para la componente frecuencial λ se define como $O_{d\lambda}$ para cada componente, como se tienen tres colores básicos R , G , y B se aplica la ecuación a cada color (Belmonte).

Si se aplica a la ecuación de iluminación el siguiente término, se obtendría como (8):

$$I_{dif\lambda} = I_{a\lambda} K_a O_{d\lambda} + f_{aat} I_{p\lambda} K_d O_{d\lambda} (N \cdot L) \quad (8)$$

Atenuación Atmosférica

Para simular la atenuación atmosférica entre el objeto y

el observador se suele proporcionar indicaciones de profundidad.

Suponiendo que el observador se encuentra en proyección ortográfica se considerará la distancia como el valor absoluto de z .

Se pueden conseguir efectos de atmósfera tomando una intensidad de fondo I_f e interpolando con la I_{dif} obtenida.

Si $|z| < d_A$ la atmósfera siempre ofrece la misma atenuación mínima S_A .

Si $d_A < |z| < d_B$ la atenuación lineal con la distancia quedaría (9):

$$S = S_B + (((|z| - d_B) (S_A - S_B)) / (d_A - d_B)) \quad (9)$$

Si $|z| > d_B$ la atenuación máxima constante sería S_B .

La componente difusa con atenuación del observador finalmente quedaría (10):

$$I' = S \cdot I_{dif\lambda} + (1 - S) \cdot I_f \quad (10)$$

dónde:

I' representa la intensidad del punto observado después de aplicar el efecto atmosférico, $I_{dif\lambda}$ indica la intensidad luminosa del punto calculada según el paso anterior, I_f indica la intensidad luminosa de fondo debido al efecto atmosférico, S coeficiente de mezcla de la iluminación atmosférica y de la iluminación recibida del objeto que depende de la distancia desde el observador al punto observado (Belmonte).

2.1.3. COMPONENTE ESPECULAR. MODELO DE PHONG

El modelo de iluminación de Phong trata de simular el comportamiento de ciertos materiales, cuya superficie regular hace que la luz sea reflejada de manera uniforme (especular), produciendo un brillo notorio en las partes de su superficie que reflejan la luz en una dirección cercana al vector en la dirección del observador. Este efecto es más apreciable en los objetos metálicos (Triana and Cuevas, 2000).

Cuando se observa en una superficie brillante iluminada, como metal pulido, se puede apreciar un punto de luz o una mancha brillante en algunas direcciones de vista. Este fenómeno se conoce como *reflexión especular* (Alcaraz, 2006). Véase la figura 3

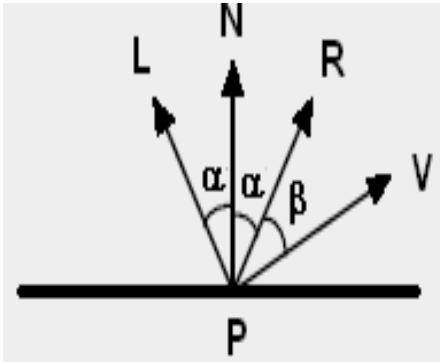


Fig. 3: Reflexión especular en un punto de una superficie (Triana and Cuevas, 2000)

En la figura se tiene una superficie y su vector normal unitario N en el punto a iluminar P ; L es el vector unitario dirigido hacia la fuente de luz; R el vector unitario reflejado; V el vector unitario que apunta al observador. El ángulo β es el formado por los vectores V y R . Para un reflector ideal (un espejo perfecto) la luz incidente se refleja solo en la dirección de reflexión especular R . En este caso solo se vería la luz reflejada cuando coincidiesen los vectores V y R ($\beta=0$) (Alcaraz, 2006).

Los objetos que no son reflectores ideales presentan reflexiones en un rango finito alrededor del vector R . Dicho rango será más amplio cuanto menor sea la brillantez de la superficie (Alcaraz, 2006).

Un modelo empírico para calcular este rango de reflexión, desarrollado por Phong, que recibe el nombre de *modelo de reflexión especular de Phong*, establece la intensidad de la reflexión especular proporcional a $\cos^n \beta$. Se pueden asignar valores para el ángulo β en el rango de 0° a 90° de modo que el $\cos \beta \in [0..1]$ (Alcaraz, 2006).

El valor que se asigna al parámetro o exponente de reflexión especular n (*factor de glossiness*³), determina el tipo de superficie que se quiere visualizar. Así una superficie muy brillante se modela con un valor alto para n , y los valores más bajos (*hasta 1*) se emplean para superficies más opacas. Para un reflector perfecto, n es infinita; para una superficie rugosa se asignaría a n un valor cercano a 1 (Alcaraz, 2006).

La ecuación de reflexión especular dada originalmente por Phong se puede expresar como (11):

$$I_{esp \lambda} = f_{aat} I_{p \lambda} k_s O_{s \lambda} \cos^n \beta \quad (11)$$

dónde:

k_s es el coeficiente o factor de reflexión especular,

³ Factor de pulimiento.

tomando valores entre 0 y 1 para indicar la cantidad de brillo que tiene una superficie; I_p es la intensidad o color de la fuente de luz puntual y $O_{s \lambda}$ color especular de un objeto para la componente frecuencial λ . Si se hace uso del cálculo vectorial, y suponiendo que tanto R como V son vectores unitarios, se tiene que $\cos \beta = R \cdot V$, se puede calcular el vector de reflexión R en términos de los vectores N y L mediante la expresión $R=2N(N \cdot L)-L$, la ecuación anterior quedaría (12) (Alcaraz, 2006):

$$I_{esp \lambda} = f_{aat} I_{p \lambda} k_s O_{s \lambda} (R \cdot V)^n \quad (12)$$

2.2. SOMBREADO DE POLÍGONOS

2.2.1. SOMBREADO DE GOURAUD

Es un método usado en los gráficos por computadora para simular los diferentes efectos de luz y color en las superficies de los objetos. En la práctica Gouraud se usa para lograr la iluminación lisa en las superficies de los polígonos (Alcaraz, 2006).

La idea consiste en calcular el vector normal de cada vértice como el promedio o suma vectorial normalizada de los vectores normales de los polígonos que contienen a dicho vértice (Dielrieux), posteriormente se aplica el modelo de iluminación únicamente, en los vértices del polígono para obtener la intensidad de la luz en esos puntos, asignándole el color resultante (Triana and Cuevas, 2000).

Algunos sistemas, a la hora de calcular la luz en los vértices, eliminan la *componente especular* del modelo de intensidad, debido a que, con Gouraud, la forma e intensidad de los brillos especulares dependen mucho de las características geométricas de la red poligonal, puesto que genera resultados imprevistos, por otro lado, para que la intensidad calculada dependa exclusivamente de la normal en los vértices, se suele suponer que las fuentes y el observador se encuentran en el infinito (Triana and Cuevas, 2000).

Para conseguir la intensidad o color en las aristas, se interpolan linealmente las intensidades de las componentes de color a lo largo de las aristas de cada polígono, asignando a cada punto el color resultante de la interpolación lineal de los dos vértices que generan la arista a la que pertenece (Triana and Cuevas, 2000).

Por último, tomando las intensidades en las aristas como valores iniciales, y siguiendo las líneas scan⁴, se calculan las intensidades de los puntos interiores de los polígonos, también mediante interpolación lineal (Triana and Cuevas, 2000).

Es muy importante destacar que todas estas

⁴ Líneas de barrido empleadas para la interpolación de intensidades y normales.

operaciones que se realizan durante la conversión scan del polígono, pueden efectuarse con técnicas aritméticas que posibilitan su implementación por hardware. Tal es así que en la actualidad las PC poseen tarjetas gráficas que reciben directamente los puntos e iluminaciones de los polígonos, y efectúan la conversión scan y sombreado de Gouraud a miles de polígonos por segundo (Triana and Cuevas, 2000).

Ventajas: Este sombreado es eficiente comparado con otros métodos, razón por la que es extensamente utilizado por los juegos de vídeo y otras aplicaciones en las que el desempeño es más importante que el resultado final.

Es rápido, disminuye la visión de las aristas y con esto mejora la visualización de las aproximaciones poliédricas de objetos curvos, soluciona los problemas de facetado y disminuye el cálculo drásticamente. Es un método provisto por las tarjetas gráficas (Dielrieux).

Desventajas: No consigue eliminar totalmente las aristas (efecto de Mach), no representa aceptablemente los brillos especulares, por lo que se suele utilizar sólo para reflexión difusa, no hay interpolación en 3D lo que conduce a perturbaciones en animación y posibles errores en superficies corrugadas (Alcaraz, 2006).

3. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

3.1. SELECCIÓN DE LOS ALGORITMOS

Se hará uso de un modelo de iluminación que cuyos parámetros de selección no son únicamente basados en la calidad de visualización sino también en el coste de procesamiento, ya que lograr un costo de cómputo aceptable se convierte en un factor de primera necesidad ya que es un algoritmo que va a ejecutarse en tiempo real, aunque se vaya a implementar en un lenguaje de shader los cuales trabajan directamente sobre la tarjeta gráfica de la máquina. Como propuesta de modelo de iluminación local o ecuación de iluminación se propone a Phong con el objetivo de hallar los valores de intensidad.

Combinándose los cálculos de la componente especular con la componente difusa y la ambiental para obtener una expresión lineal con fuentes luminosas múltiples se obtiene (13):

$$I_{\lambda} = I_{a\lambda} K_a O_{d\lambda} + \sum_{i=1,m} f_{aa\lambda} I_{p\lambda} \left[K_d O_{d\lambda} (N \cdot L_i) + K_s (R_i \cdot V)^n \right] \quad (13)$$

Se pueden observar mejorías en la escena a medida que se han incorporado componentes al modelo de iluminación de Phong. Véase la figura 4

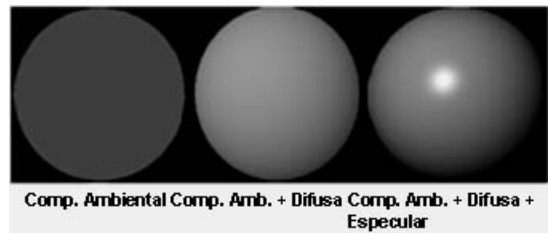


Fig. 4: Aplicación de las componentes de luz

Como la ecuación de iluminación de Phong usa el producto $R \cdot V$, debe recalcularse sobre cada punto en la superficie, calculo que es algo costoso computacionalmente. Para optimizar el mismo se puede sustituir esta operación obteniendo una buena aproximación usando el vector unitario medio entre el vector del observador V y el de la fuente de luz L (14).

$$H = \frac{L + V}{|L + V|} \quad (14)$$

Definiendo el ángulo ψ como el ángulo entre V y H , el ángulo medio. Cuando V yace en el mismo plano que L , N y R se obtiene (15): Véase la figura 5

$$\theta + \psi = \theta - \psi + \phi \quad (15)$$

obteniéndose (16):

$$2\psi = \phi \quad (16)$$

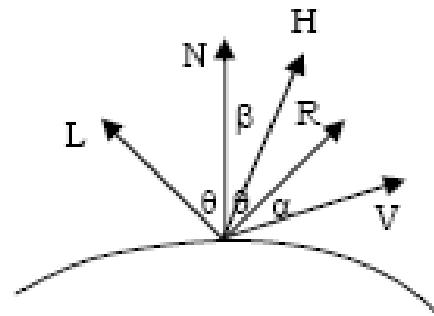


Fig. 5: Vector intermedio, H (Iluminación y Sombreado)

Si se reemplaza el producto vectorial $R \cdot V$ con $N \cdot H$, se evita calcular el vector R . Sin embargo, el ángulo ψ es más pequeño que ϕ , y, si se usa el mismo exponente n en $(N \cdot H)^n$ usado en $(R \cdot V)^n$, el tamaño de los reflejos especulares será menor. Se puede mejorar el problema reemplazando el valor del exponente n con el valor n' , para que $(N \cdot H)^{n'}$ se acerque más a $(R \cdot V)^n$. Claramente, evitar la recomputación de R es una ventaja.

De esta forma se obtendría una ecuación de Phong modificada por el vector intermedio H , con resultados análogos a la original pero menos costosa desde el punto de vista computacional, como se observa a

continuación (17).

$$I_{\lambda} = I_{a\lambda} K_a O_{d\lambda} + \sum_{i=1,m} \left(f_{aaf} I_{p\lambda} \left[K_d O_{d\lambda} (N \cdot L_i) + K_s (N \cdot H)^n \right] \right) \quad (17)$$

Una vez que se han calculado los valores de intensidad a través de Phong se procede con la aplicación de un sombreado poligonal, que en este caso será el de Gouraud por las características anteriormente planteadas y que realiza los cálculos en tiempos aceptables desde el punto de vista del coste de procesamiento.

Pasos para el cálculo del sombreado de Gouraud:

1. Calcular el vector normal de cada vértice como el promedio de los vectores normales de los polígonos que contienen a dicho vértice (18) (Sombreados, 2003). Véase la figura 6

$$N_v = \frac{\sum_{k=1}^n N_k}{\sum_{k=1}^n |N_k|} \quad (18)$$

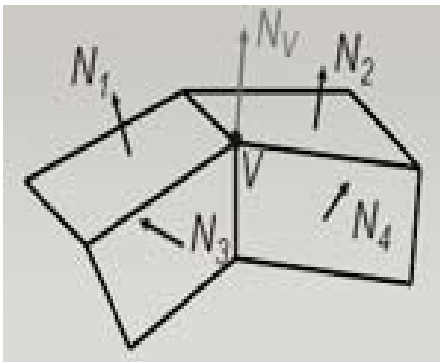


Fig. 6: Normal de los polígonos adyacentes

2. Aplicar el modelo de iluminación a cada vértice, asignándole el color resultante (Ramos, 2006).
 3. Interpolarse linealmente las intensidades de las componentes de color a lo largo de las aristas de cada polígono, asignando a cada punto el color resultante de la interpolación lineal de los dos vértices que generan la arista a la que pertenece (19) (Ramos, 2006). Véase la figura 8.

$$I_a = I_1 \frac{y_{s,n} - y_2}{y_1 - y_2} + I_2 \frac{y_1 - y_{s,n}}{y_1 - y_2}$$

$$I_b = I_1 \frac{y_{s,n} - y_3}{y_1 - y_3} + I_3 \frac{y_1 - y_{s,n}}{y_1 - y_3} \quad (19)$$

4. Calcular las intensidades de los puntos interiores, a partir de los valores calculados en las aristas. La interpolación se efectúa siguiendo la línea scan, y por

tanto, las intensidades utilizadas en la interpolación son las que se hayan en los puntos de intersección de las aristas con la línea scan (I_a e I_b). Véase la figura 11.

La ecuación de interpolación para calcular la intensidad en los puntos interiores es similar a las anteriores. La intensidad $I_{s,n}$ en un punto de la superficie viene dada por (20): Véase la figura 7

$$I_{s,n} = I_a \frac{x_b - x_{s,n}}{x_b - x_a} + I_b \frac{x_{s,n} - x_a}{x_b - x_a} \quad (20)$$

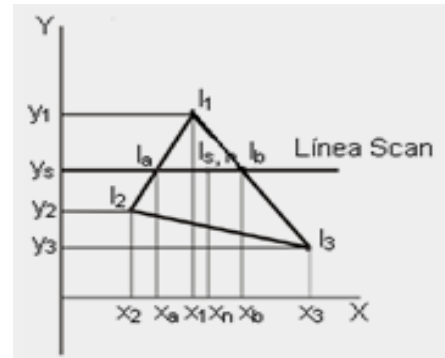


Fig. 7: Interpolación de intensidades

4. RESULTADOS

Resultado de la aplicación de la Ecuación de Iluminación de Phong con el Sombreado poligonal de Gouraud sobre el modelo clásico (*teapot*). Véase la figura 8.



Fig. 8: Teapot con iluminación

Resultados antes y después de la aplicación de la Ecuación de Iluminación de Phong con el Sombreado poligonal de Gouraud en el video-juego "Rápido y Curioso" creado en el GPJV. Véase la figura 9 y 10. **Haga énfasis en el área señalada con el círculo rojo.**



Fig. 9: Antes de la aplicación del algoritmo



Fig. 10: Después de la aplicación del algoritmo

5. CONCLUSIONES

- Se realizó un análisis de los modelos de iluminación local y sombreados poligonales utilizados en los videos-juegos actuales, el resultado de esta investigación demuestra que es factible la aplicación de la ecuación de iluminación de Phong en combinación con el sombreado poligonal de Gouraud en los videojuegos y aplicaciones 3D realizadas en el GPJV.
- El uso de estos algoritmos facilitó a los programadores del GPJV el desarrollo de aplicaciones con escenas construidas en pre-procesamiento así como también en tiempo real.
- El uso de estos algoritmos mejoró visualmente la calidad de las escenas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaraz, J.L.A. (2006). “Diseño de un Visualizador Poligonal”,
<http://ditec.um.es/~jlaragon/proyectoFC.pdf>
- López, M.J.V., Crespo, J.L. and Hernando, R.V. “Iluminación Realista para Escenas con Vegetación”,
http://www.sig.upv.es/websig/investigacion/docs/III_uminacion.pdf
- Triana, H.F and Cuevas, A.R., (2000), “Sistema para la Reconstrucción Gráfica Tridimensional de Objetos Físicos en Computador”, Tesis de ingeniería. Dpto. de Sistemas. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Belmonte, A.M. “Modelos de Iluminación”,
<http://dis.um.es/grupos/sig/08BI/iluminacion.pdf>
- Visualización de Polígonos. “Sombreados”. (2003). Dpto. de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial. Universidad de Alicante.
<http://www.dccia.ua.es/dccia/inf/asignaturas/GC/Teria/Tema207b.%20Sombreado%20de%20poligonos.pdf>
- Dielrieux, C., “Introducción a la Computación Gráfica”.
<http://www.memi.umss.edu.bo/mscinfo/cursos/graficos/apunte.pdf>
- Ramos, R. (2006). “Visualización Standard. Obtención de la imagen discreta”.
<http://di002.edv.uniovi.es/~rr/Tema10.pdf>
- Cap. IV. “Iluminación y Sombreado”.
http://asignaturas.inf.udec.cl/cgraf/public_html/iluminacion.pdf

7. BIBLIOGRAFIA

- Randima, F., Mark, J. K. (2003), “The Definitive Guide to Programable Real-Time Graphics”.
- Rost, R., (2006), OpenGL® Shading Language, 2 ed. U.S: Addison Wesley Professional. Kessenich, J., (2004), “Features of the OpenGL Shading Language”.

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.