

Trabajo Fin de Grado

Rendering perceptual de escenarios. Aplicación a
túneles y su señalética en situaciones de
emergencia

Autor

Alejandro Serón Ruiz

Directores

Magister. Teresa Blanco Bascuas

Dr. Juan Antonio Magallón

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2013

Según la normativa interna de gestión de los trabajos fin de grado y fin de máster de las titulaciones que se imparten en la escuela de ingeniería y arquitectura de la universidad de Zaragoza Artículo 4. Tipología de los TFG y TFM: Este proyecto es del tipo B.

Tipo B:

“Con un contenido más libre, que puede consistir en estudios técnicos, estudios económicos, estudios sobre gestión de calidad, elaboración y aplicación de programas informáticos, investigación, etc..., en el ámbito de la titulación.”

Dedicatoria

A mis padres

A mi novia María

A mis amigos

Agradecimientos

A mi directora Teresa Blanco Bascuas

Por haberme aceptado, por haberme sugerido el ámbito de aplicación (túneles, señalética, situaciones de emergencia), por las sugerencias recibidas y sobre todo por haberme dado la libertad bajo su supervisión de elegir el tema de la simulación visual.

A mi director Juan Antonio Magallón Lacarta

Por haberme proporcionado el acceso al resultado de su magnífica tesis doctoral, haber aceptado incluir mi propuesta de operador en sus librerías y programarlo en C++, y sobre todo por tener la paciencia de aguantar la cantidad de detalles y de exigencias propias de un diseñador industrial, a la hora de especificar los diferentes escenarios.

A mi padre

Por ponerme en contacto con Juan, y por comunicarme su experiencia docente cuando yo se la he pedido.

Rendering perceptual de escenarios. Aplicación a túneles y su señalética en situaciones de emergencia.

Resumen del proyecto

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado pretende conseguir que un sistema de rendering basado en la física genere imágenes que sean lo más fieles posibles a lo que vería un ser humano, aplicándolo a señales de emergencia en túneles en el caso de un incendio o apagón.

La estructura de la memoria está formada por ocho capítulos, acompañados de la bibliografía citada y un conjunto de once apéndices.

La memoria se inicia con una introducción que incluye contexto, problema abordado, objetivo del TFG y la estructura de la misma.

El capítulo dos se dedica a realizar una presentación general de los aspectos relacionados con túneles, señalética y normativa, y caracterización del usuario.

El siguiente capítulo describe aspectos relacionados con el color y su caracterización perceptual.

El capítulo cuatro analiza el problema de la simulación físicamente creíble de la iluminación recogiendo el fenómeno de la visión, el rendering basado en la física y reflexiona sobre las características que tiene que reunir el software utilizado. El software seleccionado ha sido la biblioteca denominada ALEPH.

El quinto capítulo introduce la problemática asociada a la generación de imágenes perceptualmente creíbles y describe en profundidad el operador de reproducción de tono seleccionado (Ferwerda) y su implementación expresada mediante pseudocódigo.

En el capítulo que sigue se aplica todo el conocimiento adquirido al caso de un túnel en las situaciones normal y de emergencia (incendio y apagón). Y se generan un amplio conjunto de imágenes sintéticas que permiten analizar visualmente en detalle dichas situaciones. Se han utilizado para su obtención el operador de tono perceptual de Ferwerda, el operador de tono estético de Reinhard y otros tres operadores más simples que el de Ferwerda.

Se finaliza con las conclusiones de este TFG y se indican posibles líneas de trabajo futuro.

La memoria se acompaña de un diagrama temporal de todo el trabajo, de la bibliografía referenciada y de los apéndices que recogen normativas, fichas técnicas, explicaciones en profundidad de la física de la visión y de la ecuación de rendering.

Índice de contenidos:

1. Introducción, contexto, problema abordado, objetivo del TFG y estructura de la memoria	1
1.1. Introducción	1
1.2. Contexto	2
1.3. Problema abordado	2
1.4. Objetivo	2
1.5. Estructura de la memoria	3
2. Información general	5
2.1. Túneles	5
2.1.1. ¿Qué es un túnel?	
2.1.2. Situaciones críticas en un túnel	
2.2. Señalética y normativa	7
2.2.1. ¿Qué es una señal?	
2.2.2. Consideraciones de diseño	
2.2.3. Estudio de recursos tecnológicos y materiales de señales luminosas	
2.3. Usuarios	10
2.3.1. Usuario beneficiario	
2.4. Otros entornos	13
3. El color y su caracterización perceptual	15
3.1. El ojo	15
3.2. Espacios de color	18
4. Simulación físicamente creíble de la iluminación.	21
4.1. El fenómeno de la visión desde un punto de vista fenomenológico	21
4.2. El trazado de rayos	22
4.3. Rendering basado en la física	22
4.4. Reflexiones	23
4.5. ¿Qué software utilizar?	25
5. Generación de imágenes perceptualmente creíbles.	27
5.1. El problema de la visualización perceptual	27
5.1.1. Alto rango dinámico (resultados de la simulación)	
5.1.2. Bajo rango dinámico (posibilidades de los monitores)	
5.1.3. Reproducción de tono (estado del arte)	
5.2. Operador de reproducción de tono	31
5.2.1. Comportamiento visual del ojo humano	
5.2.2. Descripción del operador	
5.2.3. Implementación del operador	

6. Aplicación al caso de un túnel. Especificaciones de la escena y resultados	39
6.1. Especificación de la escena	39
6.1.1. Túnel	
6.1.2. Señales	
6.1.3. Usuario	
6.1.4. Situaciones analizadas	
6.2. Resultados 1. Imágenes perceptuales en un ambiente normal	45
6.3. Resultados 2. Imágenes perceptuales en caso de incidentes	47
6.3.1. Apagón	
6.3.2. Con humo (0,2) con luces	
6.3.3. Con humo (0,3) con luces	
6.3.4. Con humo (0,4) con luces	
6.3.5. Con humo (0,2) sin luces	
6.3.6. Con humo (0,3) sin luces	
6.3.7. Con humo (0,4) sin luces	
6.3.8. Con reproductor de tono estético	
7. Conclusiones y trabajo futuro	65
8. Diagrama temporal	67
9. Bibliografía	69
10. Apéndices	71
1. Túneles y situaciones de emergencia en túneles	
2. Señalética y normativa	
3. La física de la visión	
4. Ecuación de rendering basado en la física	
5. ¿Qué software de rendering utilizar?	
6. Otros experimentos que describen el comportamiento del ojo	
7. Implementación del algoritmo	
8. ficha_tecnica_implaled	
9. Impacto visual del humo en túneles	
10. Capítulo 13. Iluminación de túneles INDAL	
11. Resultados obtenidos utilizando otros reproductores de tono	

1 Introducción, contexto, problema abordado, objetivo del TFG y estructura de la memoria

1.1 Introducción

Idea 1:

La cognición (del latín: *cognoscere*, "conocer") es la capacidad de un ser vivo para procesar información a partir de la percepción, el conocimiento adquirido (experiencia) y las características subjetivas que permiten valorar la información.

Idea 2:

Mediante la cognición el ser humano es capaz de aprender, razonar, resolver problemas, tomar decisiones, procesar el lenguaje,...

Idea 3:

La cognición está íntimamente relacionada con todos aquellos aspectos abstractos y prácticos que intervienen en un proceso de diseño industrial.

Idea 4:

Teniendo en cuenta que:

- Los conos y bastones suponen el 70% de los receptores sensoriales de todo el organismo.
- Casi un 20% de las vías nerviosas aferentes están constituidas por fibras de los nervios ópticos.
- Las áreas de la corteza cerebral implicadas en el análisis de las señales visuales están especialmente desarrolladas en primates y humanos.
- Un alto porcentaje de nuestras memorias están basadas en esquemas visuales.

Es tal la organización del cerebro, que su poder integrador es mayor en los ojos, mucho menor en el oído y aun menor en el olfato y en el gusto. Esta capacidad humana para asimilar y evaluar información indica que el lenguaje visual es necesario a la hora de comunicar conceptos e ideas de la forma más poderosa e intuitiva posible.

Conclusión:

Aplicaciones como el diseño industrial, la fabricación, el marketing y otros muchos campos utilizan el proceso de generación de imágenes sintéticas (renderizado) ofrecido por la Informática Gráfica, para diseñar y visualizar sus productos. La fidelidad con respecto a la apariencia es a menudo crítica. El no tener en cuenta esto puede producir distorsiones en la apariencia percibida que pueden influir en errores de diseño y fabricación, que repercutan en aspectos económicos no deseados.

1.2 Contexto

En el proceso de diseño de señalética en túneles para situaciones de emergencia existe un paso relacionado con pruebas y observaciones del diseño propuesto, que pasa por someter al prototipo a pruebas físicas (cuando es posible) o bien se recurre a la simulación cuando no sea factible lo anterior.

El problema, en ciertas situaciones de emergencia como los incendios, al intentar someter cualquier tipo de prototipo relacionado con la señalética a pruebas físicas, es que las condiciones requeridas para realizar las mismas están fuera de las posibilidades de la gran mayoría de las empresas que diseñan señales, por lo tanto se deben realizar pruebas simuladas.

En este TFG se analiza la utilidad de la simulación debido a la dificultad de analizar visualmente “in situ” el comportamiento de las señales en túneles en situaciones de emergencia, ya que esto es muy caro y complicado.

Para realizar estas simulaciones es necesario hacer uso de sistemas de rendering, específicamente de “rendering basado en la física”. Ahora bien, la imagen final que se obtiene sobre la pantalla de un ordenador puede tener como objeto la estética o la fidelidad a la realidad que vería un ser humano.

1.3 Problema abordado

El problema que plantea este TFG es que los programas de rendering de alta calidad habitualmente usados por los diseñadores industriales permiten el rendering basado en la física pero no están orientados al rendering perceptual, por lo tanto no son útiles para el contexto citado.

1.4 Objetivo

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es conseguir que un sistema de rendering basado en la física genere imágenes que sean lo más fieles posibles a lo que vería un ser humano, aplicándolo a señales de emergencia en túneles en el caso de un incendio o apagón.

1.5 Estructura de la memoria

Esta memoria está organizada en 8 apartados, bibliografía y 11 apéndices. En el apartado 1, como se acaba de ver, se introduce la temática, el contexto, el problema abordado y el objetivo del TFG. En el apartado 2 se da información general relativa a túneles, señalética y normativa, usuarios y otros entornos. En el apartado 3 se tratan aspectos del color que son necesarios para esta memoria. En el apartado 4 se describe con detalle el proceso de simulación físicamente creíble de la iluminación y las características requeridas por el software capaz de realizarlo. En el apartado 5 se habla del problema de la visualización perceptual y del operador de reproducción de tono que se ha seleccionado para alcanzar los objetivos de este trabajo. En el apartado 6 se realiza una simulación perceptualmente creíble de un túnel en situación normal y crítica (incendios/humo - apagón) y se presentan los resultados obtenidos comentados desde un punto de vista fenomenológico y de diseñador industrial. En el apartado 7 se presentan las conclusiones de este trabajo y se proponen líneas de trabajo futuro. Se finaliza en el apartado 8 con el diagrama de Gant. La memoria viene acompañada por la bibliografía utilizada (apartado 9) y un conjunto de apéndices en los que se describen aspectos relacionados con la memoria de una manera más amplia.



2 Información general

El ámbito de aplicación de este TFG es el de la visualización de señales en túneles en situación de emergencia. Por ello este apartado pretende dar la información referente a túneles, señales y usuarios.

La estructura de este apartado va a seguir el siguiente esquema:

- Túneles
- Señalética
- Usuarios
- Otros entornos

2.1 Túneles

2.1.1 ¿Qué es un túnel?

- Desde el punto de vista general se define como: *un paso subterráneo abierto artificialmente para establecer una comunicación*. Los túneles proporcionan hoy en día unas facilidades de comunicación que se traducen en: una reducción de tiempos de desplazamiento, de consumo de combustibles y de cierto tipo de riesgos viarios (caídas en taludes por salirse los vehículos de la calzada en puertos de montaña, etc.) [Orta, 2002]. Todo ello, se traduce en una mayor eficiencia económica y en una mayor seguridad y comodidad para los conductores.
- La caracterización de un túnel requiere describir sus partes estructurales y el equipamiento general (ver Apéndice 1 - Apartados 1.1/1.2)

2.1.2 Situaciones críticas en un túnel

- Incendio. La situación de mayor riesgo derivada de un accidente en un túnel es un caso de incendio. Esto es debido a que los túneles, al ser cavidades muy aisladas del exterior, presentan el problema de la dificultad de eliminación del calor, el humo y las sobrepresiones.

La caracterización de un incendio en un túnel se basa en el tipo de combustible y en las causas (ver Apéndice 1 – Apartados 2.1.1/2.1.2)

La problemática de los incendios en túneles proviene del efecto horno, del efecto cañón y del control de humos. El riesgo del humo es muy elevado, causa baja visibilidad, con la consecuente desorientación del usuario y asfixia, dificultando la salvaguardia del usuario. Es además la principal causa de muerte de los accidentes en túneles. (Ver Apéndice 1 – Apartado 2.2)

Los riesgos para la vida humana surgen por:

- Alta temperatura del aire ($>80^{\circ}\text{C}$)
- Radiación de calor del fuego
 - $<2,5 \text{ KW/m}^2$ para usuarios
 - $\sim 5 \text{ KW/m}^2$ para bomberos equipados
- Gases tóxicos (CO, NO, HCl....)
- ***Pérdida de la visibilidad a menos de 7 m***
- Caída de objetos y/o elementos ($>450^{\circ}\text{C}$)
- Destrucción de equipamiento de seguridad
- Lajeo (Spalling) del hormigón

El humo consecuencia de un incendio es uno de los elementos a considerar en este trabajo por lo que es necesario describir su comportamiento dentro de un túnel. Dicha descripción se puede encontrar en el Apéndice 1 – Apartado 2.3 y Apéndice 9 [Migoya, 2002].

En los últimos 20 años el número de accidentes en túneles ha aumentado de manera significativa, muchos de ellos motivados por falta de protocolo y ausencia de instalaciones adecuadas (muchos de los túneles de las principales arterias europeas de transporte están anticuados y son necesarias reformas). Así pues, el estudio de estas situaciones puede ayudar a extraer conclusiones que ofrezcan una mayor protección del usuario durante la evacuación, así como a un menor recuento de daños en las instalaciones. En el Apéndice 1 – Apartado 2.4 pueden encontrarse información referente a los tres principales accidentes de túnel de los últimos 20 años. En el apartado 2.4.4 de dicho Apéndice se recoge un conjunto de comentarios a modo de conclusiones.

Entre los problemas de intervención externa en caso de incendio (ver Apéndice 1 – Apartado 2.5) se destacan los que tienen que ver con la problemática del humo que puede conducir a comportamientos impredecibles:

- El de “las limitaciones en la ventilación” que lo incrementa.
 - El del “efecto psicológico negativo” como resultado de la reducida visibilidad.
-
- Congestión (ver Apéndice 1 – Apartado 2.2)
 - Vehículo roto (ver Apéndice 1 – Apartado 2.3)

2.2 Señalética

2.2.1 ¿Qué es una señal?

Una señal es un signo, un gesto u otro tipo de interacción que permite informar o avisar algo. La señal sustituye, por tanto, a la palabra escrita o al lenguaje. Obedecen a convenciones, por lo que son fácilmente interpretadas.

Las primeras señales en carreteras eran montones de piedras a los lados de los caminos. Posteriormente fueron sustituidas por pilones de piedra. La siguiente evolución surgió con los postes de madera, que indicaban distintas direcciones y estos postes, asimismo, fueron sustituidos por las señales metálicas de hoy en día (ver figura 1).

Dichas señales metálicas están actualmente evolucionando a señales luminosas, que mejoran la visibilidad y, en última instancia, la seguridad vial.



Figura 1. Evolución histórica de las señales

2.2.2 Consideraciones de diseño

Dentro de la normativa ISO encontramos principios de diseño para la elaboración de señalética (ver Apéndice 2 – Apartado 3). Es especialmente interesante dentro de la ISO 3864-1 para este trabajo la “relación entre las dimensiones de las señales y la distancia de observación” (ver figura 2).

La relación entre la mayor distancia desde la cual la señal es legible y sobresaliente en forma y color, y la altura de la señal es dada por la fórmula:

$$h=L/Z$$

Donde:

- L es la distancia de observación, h es la altura de la señal y Z es el factor de distancia ($1/\tan \alpha$ de la extensión angular de la señal).
- El factor Z dependerá de la altura de la señal, la dimensión de los detalles críticos, la luminancia de la señal y su contraste respecto del fondo.

El ratio r es el cociente entre la altura de la señal y el tamaño de los detalles críticos y debe ser menor o igual a 15. Si es mayor, el valor de Z deberá corregirse por factor multiplicador $15/r$.

Bajo esta condición geométrica, el factor de distancia Z sin corregir, válido para señales iluminadas debe ser 100 si la luz incidente de la superficie de la señal es más de 50 lx y, preferentemente más de 80 lx.

Las señales de salida iluminadas y señales de rutas de escape direccional con luminancia promedio del color de contraste mayor de 500 cd/m² deben doblar el factor de distancia y, por lo tanto, la distancia de observación.

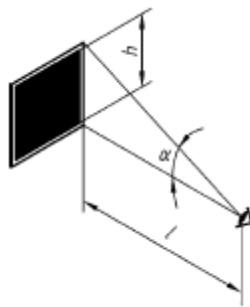


Figura 2. Relación entre la dimensión de la señal y su distancia de observación

También debe ser suficientemente llamativo en contextos brillantes.

En contextos oscuros, la luminancia debe reducirse para evitar reflejos o alteración.

2.2.3 Estudio de recursos tecnológicos y materiales de señales luminosas

El siguiente paso en la evolución de las señales consiste en su iluminación. En el caso de las señales de tráfico, el uso de tecnología LED es el mecanismo más extendido y también el más útil, sin embargo, la electroluminiscencia y la retroiluminación también son utilizadas (ver Apéndice 2 – Apartado 4).

Estas tres tecnologías se han considerado en las simulaciones cuyos resultados se presentan en este trabajo debido a que:

- La iluminación LED es mejor porque tiene menor consumo, mayor vida útil, ocupa menos espacio y tiene más potencia lumínica.
- La potencia lumínica viene determinada por el tipo de iluminación usado. Incluso del tipo de LED (de alta luminosidad, de baja luminosidad).
- El consumo también está relacionado con el tipo de iluminación usado.
- La autonomía depende también del tipo de iluminación usado y de los materiales foto luminiscentes y de la capacidad de los mismos. La normativa UNE 23035 cataloga los tipos de material foto luminiscente en función de su autonomía y potencia lumínica.
- A mayor diversidad de zonas donde pueda posicionarse (incluso lugares de difícil acceso o posicionamiento) mejor visibilidad general.
- La incorporación de sensores en una gran mayoría de los productos no es posible, sin embargo es una característica muy útil que debe tenerse en cuenta.
- La posibilidad de que sean foto luminiscente también está poco explotada (aunque más que la incorporación de sensores) y también es muy importante. Es mejor añadir materiales foto luminiscente que añadir baterías que son más caras y aumentan la complejidad del producto.

2.3 Usuarios

Este trabajo tiene en cuenta a dos tipos de usuarios:

- El usuario beneficiario, localizado dentro del túnel, cuyo comportamiento visual se va a modelar y simular.
- El usuario diseñador, que puede utilizar de este modelo y de las simulaciones como herramienta de diseño.

2.3.1 Usuario beneficiario

Cuando se realiza el estudio de todos los aspectos relacionados con el individuo cobran especial relevancia para este proyecto, la percepción visual, la orientación y la atención.

Además si se tienen en cuenta que en ciertas situaciones críticas, como las que surgen en un incendio en un túnel, no se van a cumplir algunas de las leyes de la teoría de la Gestalt, en particular la “Ley general de la figura y fondo” y la “Ley general de la buena forma” (ver <http://www.guillermoleone.com.ar/LEYES%20DE%20LA%20GESTALT.pdf>) páginas 3 y 4 respectivamente. El resultado va a ser la aparición de un estado de ansiedad en el ser humano, que va a alterar desde un punto de vista emocional el comportamiento cognitivo. El hipocampo y la amígdala son las estructuras cerebrales que intervendrán en este tipo de situaciones de emergencia y provocan tal comportamiento (ver <http://www.asociacioneducar.com/monografias/navarro.pdf>).

También se sabe que un usuario en una situación de emergencia en general pero más específicamente en un incendio en un túnel, se encontrará bajo los efectos de la ansiedad, el estrés y el miedo con las consecuencias de comportamiento que se describen en las normas NTP 390 y NTP 395 relativas a *La Conducta humana ante situaciones de emergencia: análisis de proceso en la conducta colectiva* (Ministerio de trabajo y asuntos sociales del Gobierno de España).

Otros factores que pueden influir en el comportamiento del usuario en estas situaciones son (ver Tabla 1 obtenida de la norma NTP 390):

Tabla 1

CARACTERÍSTICAS de CONTEXTO	CARACTERÍSTICAS de USUARIO
Tipo de situación	Edad
Tipo de siniestro	Sexo
Características del emplazamiento	Condiciones físicas
Tipo de permanencia	Condiciones psíquicas
Momento del día	Personalidad tipo
Material disponible	Tolerancia a la frustración
Características ambientales	Tendencia al gregarismo
Familiaridad del entorno	Territorialidad
Acceso a la información	Estado emocional
	Aislamiento/apoyo
	Liderazgo
	Sentido de la orientación
	Percepción
	Información Experiencia
	Adiestramiento/Formación

Caben destacar también la aparición de los comportamientos predominantemente individuales que se describen en la norma NTP 390 relativas a *La Conducta humana ante situaciones de emergencia: análisis de proceso en la conducta individual* (Ministerio de trabajo y asuntos sociales del Gobierno de España) que son:

- El 75% manifiesta conducta desordenada, desconcierto
- El 10-25% muestran confusión, ansiedad, paralización, gritos histéricos y pánico
- El 10-25% permanecen unidos y en calma, estudian el plan de acción y posibilidades

A lo que hay que añadir comportamientos específicamente detectados en incendios [Fuentes-Cantillana, 2011] el:

- 37% intentan extinguir el fuego
- 24% avisan a otras personas
- 16% decide evacuar
- 23% no actúan

Otros posibles problemas sobre los que se ha informado son (Orta, 2002):

- Desorientación de los usuarios
- Comportamiento ingenuo de los usuarios

Por último, aspectos importantes que deben tenerse en cuenta son los relativos a la relación visual del usuario beneficiario con las señales, y que se definen en base a los siguientes puntos:

- La información deberá guiar y reducir la incertidumbre del usuario a lo largo de todo el suceso y solo será suprimida cuando desaparezca la situación de emergencia. Las señales se instalarán de tal forma que, cuando el usuario pierda la visión de una señal, deberá ser visible la siguiente (Real Decreto 485/1997)
- Se deberá evitar, la saturación de señales, recomendando su agrupación en función de su significado (Real Decreto 485/1997; NTP 395)
- Se debe asegurar un funcionamiento óptimo independientemente de la situación: con suplemento de energía alternativa, manteniendo la visibilidad (evitando la obstaculización de las señales, respetando el ángulo visual, la altura, el tamaño).
- Se asegurará la localización estratégica en lugares visibles y en accesos, asegurando una transmisión clara de la información (Real Decreto 485/1997).
- Las señales luminosas deberán ofrecer al usuario el suficiente contraste, sin deslumbramientos, y considerando la situación de uso (Real Decreto 485/1997)
- Se usarán técnicas para la transmisión de la urgencia (intermitencia, aumento de la intensidad o de la rapidez en señales acústicas, etc...)(Real Decreto 485/1997).
- Quedarán delimitadas las vías de circulación (Real Decreto 485/1997).
- Se deberá facilitar la accesibilidad y la correcta visibilidad independientemente de las características del individuo en cuanto a deficiencias físicas (movilidad, visuales, etc...).
- La información deberá ser transmitida de tal forma que consiga adecuarse a las necesidades psicológicas de los usuarios.
- Se tendrá en cuenta que las emociones influyen sobre el procesamiento cognitivo.

2.4 Otros entornos

Además del análisis de los túneles (urbanos y carreteros), se puede ampliar el ámbito de este estudio incluyendo otros entornos como los:

- Edificios complejo multinivel
- Transportes subterráneos: metro, trenes
- Transportes aéreos
-

Los motivos para incluirlos son que en estos entornos:

- La situación de mayor riesgo aparece cuando surge un incendio.
- La iluminación constituye un factor crítico a la hora de dirigir los movimientos del sujeto (Vilar et al 2013), tanto a nivel de intensidad como de color.
- Se utilizan señales que sirven para transitar por ellos, tanto en situaciones normales como en situaciones críticas.
- En caso de situaciones críticas (como un incendio), el comportamiento de los usuarios es análogo al de los usuarios en un túnel (estados de ansiedad, estrés y miedo).
- Algunos de ellos comparten una serie de características propias de los túneles, como los metros y trenes, y otros se contemplan como entornos más complejos, como los edificios multinivel.

Aunque para la simulación realizada en este TFG se ha escogido como ejemplo la señalética en túneles en una situación de emergencia concreta (incendio), esta técnica puede aplicarse a estos entornos en situaciones de emergencia análogas.



3 Color y su caracterización perceptual

La realidad del mundo visual que nos rodea está llena de color, Ver figura 3

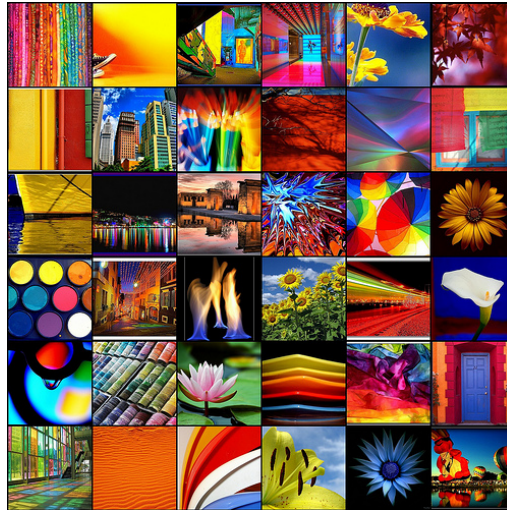


Figura 3.

El color es la propiedad de la capacidad de percepción visual humana que permite categorizar los objetos utilizando palabras como, rojo, azul, amarillo,...

3.1 El ojo

El ojo es un órgano que detecta una pequeña porción del espectro electromagnético que alcanza la Tierra. Dicha porción está comprendida entre 380 y 780 nanómetros de longitud de onda (λ). Pero el ojo no se comporta como un dispositivo de medida ideal de laboratorio que mediría por igual independientemente de la (λ). El ojo no reacciona del mismo modo a las diferentes longitudes de onda, es decir no tiene la misma sensibilidad. La función de sensibilidad o de eficiencia es una función que pondera lo mal o bien que detecta cada (λ). Le asigna un valor 1 a la que ve mejor y al resto le asigna un valor comprendido en el intervalo [0-1). Dicha función se ha medido experimentalmente en laboratorio con humanos ver figura 4.

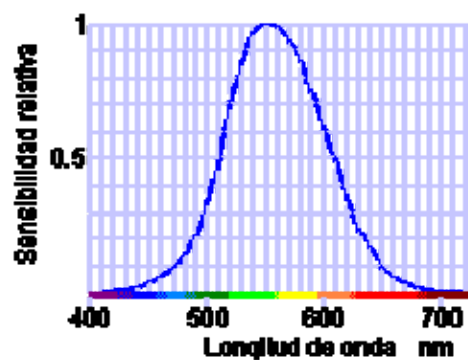


Figura 4. Función de sensibilidad

La luz que entra en el ojo: primero atraviesa la córnea (una membrana transparente), luego entra en la pupila (una apertura que es modificada por el iris, un diafragma muscular), seguidamente es refractada por las lentes y finalmente golpea los foto receptores de la retina. Dichos foto receptores, convierten la luz en señales eléctricas que son transmitidas a través del nervio óptico al córtex visual, que es el área del cerebro encargada de procesar estas señales y producir la sensación de imagen percibida.

Hay dos tipos de foto receptores, los conos y los bastones. Los conos, alrededor de 6 millones, están localizados en la fovea y son responsables de los aspectos cromáticos. Los bastones alrededor de 90 millones, son sensibles a los valores de intensidad de la luz.

Por lo tanto, el ojo humano distingue tres estímulos diferentes, ver la figura 5. Esto establece la naturaleza tridimensional de la luz.



Figura 5

Esos estímulos están relacionados con:

- La cantidad de luz
 - Brillo (lightness): Es la cantidad de luz que refleja una superficie dada independiente de su cromaticidad.
 - Este parámetro correlaciona con el atributo psicológico de la claridad.
 - Produce una sensación acromática
 - La magnitud medible por un dispositivo físico es la radiancia (magnitud radiométrica)
 - La magnitud observable por un ojo es la luminancia (magnitud fotometría).

- Dada una Radiancia, el cálculo de una Luminancia sencillamente tiene que ver con aplicar la función de sensibilidad como corrección.
- La luminancia se mide en $2\text{cd}/\text{m}^2$



Figura 6. Como se pasa de la radiometría a la fotometría

- La cromaticidad:
 - Tono (hue): (λ) dominante, (rojo, amarillo,...)
 - El equivalente físico es la longitud de onda
 - Este parámetro correlaciona con los colores espectrales puros.
 - Saturación: Es una medida del grado de disolución del tono en el color blanco. Un color puro es 100% saturado. La luz blanca es 0% saturada.
 - Se mide analizando la diferente proporción del resto de la radiación (λ) con respecto a la dominante. Cuanto más estrecho es el ancho de banda en que están contenidas las longitudes de onda, más saturado es el color.
 - El equivalente físico es la pureza

En la siguiente figura se muestra una representación visual de los tres estímulos que el ojo detecta.

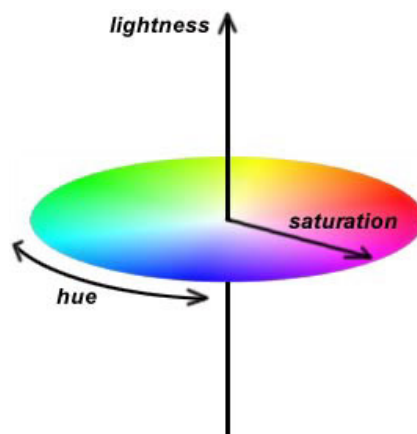


Figura 7. Representación visual de los tres estímulos

Como se ha dicho, hay dos tipos de foto receptores, los conos y los bastones.

- Los conos, son sensibles a los niveles de luminancia entre 10^{-2}cd/m^2 y 10^8cd/m^2 (a este intervalo de la visión humana se le denomina visión fotópica diurna) y son responsables de la percepción de patrones de frecuencia alta, movimiento rápido y colores. Hay tres tipos de conos, los conos de onda corta o conos S (sensibles a 435 nm), los conos de onda media o conos M (sensible alrededor de 530 nm) y los conos de onda larga o conos L (sensibles alrededor de 580 nm).
- Los bastones, alrededor de 90 millones, son sensibles a los valores de luminancia entre los 10^{-6}cd/m^2 y los 10^{-2}cd/m^2 (a este intervalo de la visión humana se le denomina visión escotópica nocturna). Son más sensibles que los conos pero no proveen de la sensación de color visual. Esta es la razón por la cual no podemos discernir colores con un nivel de iluminación bajo.

A niveles de luz comprendidos entre 10^{-2}cd/m^2 y 10cd/m^2 los conos y los bastones están ambos activos, a dicho intervalo de la visión humana se le denomina visión en el rango mesópico.

Como se verá con posterioridad, el comportamiento de los conos y de los bastones es muy diferente tanto en los aspectos cromáticos como en los diferentes intervalos de luminancia.

3.2 Espacios de color

Un espacio de color es una descripción geométrica que sirve para representar colores, típicamente en base a tres componentes llamados colores primarios. Con relación a la informática, hay dos tipos de espacios de color: los dependientes del equipo y los no dependientes del equipo. Los primeros describen el color en relación a la tecnología usada para reproducirlo. La parte negativa de este espacio es que un mismo color con las mismas coordenadas ($R=150$, $G=40$, $B=180$) se verá distinto cuando se represente en diferentes monitores. Por otro lado un espacio de color independiente de la tecnología no depende de las características de ésta por lo que el color representado siempre se corresponderá con la misma información de color. Un espacio típico dependiente de la tecnología es el RGB de los monitores, mientras que un espacio independiente típico es el CIE 1931 XYZ.

Espacio de color CIE 1931 XYZ

El espacio de color CIE 1931, es el nombre de uno de los primeros espacios de color independiente de dispositivo. Fue establecido en 1931, por la Comisión Internationale de l'Éclairage (CIE), basándose en una serie de experimentos de laboratorio con seres humanos. Como resultado de dichos experimentos se definieron con precisión los tres colores primarios \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} de la síntesis aditiva de color, a partir de los cuales pueden crearse o especificarse todos los demás. La cantidad de cada color primario que interviene recibe el nombre de coordenadas de color.

$$\text{Un Color} = X\bar{x} + Y\bar{y} + Z\bar{z} \text{ por lo tanto sus coordenadas son } (X, Y, Z)$$

Dado el gran esfuerzo realizado para definir dicho espacio, las coordenadas de color se diseñaron para que los valores triestímulos XYZ fueran análogos a la respuesta de los conos LMS del ojo humano.

Además el modelo CIE se pensó para poderlo utilizar en aplicaciones en las que lo importante fuera obtener respuestas perceptuales del ojo, consiguiéndose que el valor de la coordenada de color Y fuera la luminancia (el brillo), para conseguirlo lo que hicieron fue que la curva correspondiente al color \bar{y} primario fuera exactamente igual a la curva de eficiencia del ojo que es la que interviene en la definición de la magnitud luminancia.

Resumen de las principales características del sistema CIE XYZ:

- Es un espacio de color independiente de la tecnología
- Se basa en el uso de magnitudes físicas espectrales
- Refleja el comportamiento de los conos y de los bastones del ojo
- La componente (Y) de las coordenadas de color representa la luminancia.



4 La simulación físicamente creíble de la iluminación mediante un computador

En este apartado se va a describir el fenómeno de la visión desde un punto de vista fenomenológico. Se introduce la técnica geométrica del trazado de rayos asociado al algoritmo de rendering basado en la física como paradigmas de obtención de imágenes sintéticas foto realistas. Se realizan un conjunto de reflexiones y se finaliza respondiendo a la pregunta ¿Qué software utilizar?

4.1 El fenómeno de la visión desde un punto de vista fenomenológico

La radiación electromagnética (luz visible longitudes de onda comprendidas entre [380-830 nanómetros]) proveniente de la fuente (en el caso de la figura es el sol) viaja por el espacio en línea recta interaccionando con los materiales hasta llegar a un objeto donde se refleja.

La radiación reflejada se propaga entonces hasta el ojo humano donde incide en la retina; una vez allí dará lugar al nacimiento de un impulso eléctrico que viaja a través de las conexiones nerviosas hasta la corteza, originando la percepción de la imagen cromática del objeto dependiendo de la longitud de la onda. (Ver figura 8).

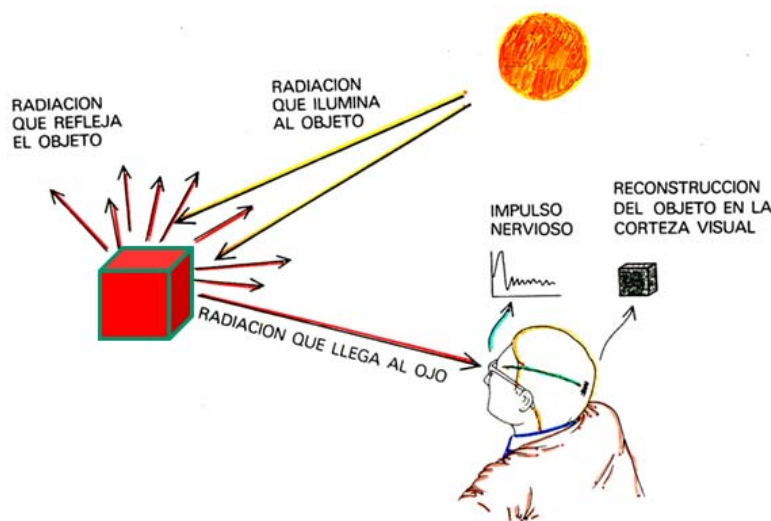


Figura 8. Fenómeno de la visión. Obsérvese la fuente, el objeto, el ojo, el impulso nervioso y la radiación.

Si queremos que un computador reproduzca lo más adecuadamente posible “todos” los fenómenos que se acaban de citar, el algoritmo que tiene que diseñarse debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Hay que caracterizar el comportamiento radiométrico espectral de las fuentes luminosas (Radiancia y color)
- Hay que caracterizar el comportamiento óptico espectral de reflexión del material.
- Hay que calcular las trayectorias geométricas que siguen los rayos.

- Hay que calcular la interacción de la energía luminosa con el material que consiste en calcular la radiancia saliente que alcanza el ojo, en función de la radiancia entrante y el coeficiente de reflexión del material.
- Dado que dicha radiancia alcanza un ojo, hay que transformar dicha magnitud en coordenadas X, Y, Z fotométricas (luminancia y cromatismo) y posteriormente hay que transformar dichas coordenadas en coordenadas del dispositivo, normalmente RGB.

Para una descripción completa del fenómeno de la visión desde un punto de vista fenomenológico, ver el Apéndice 3 titulado “La física de la visión”.

4.2 El trazado de rayos

El trazado de rayos es un algoritmo que tan sólo modela el comportamiento geométrico de la luz que sigue trayectorias rectas (rayos), con la geometría de los objetos. Cuando este algoritmo se une con un modelo de iluminación basado o no en la Física, esta técnica puede reproducir efectos visuales más o menos complejos. Por eficiencia, el algoritmo funciona disparando rayos desde la cámara virtual, que pasan por los píxeles de pantalla y atraviesan la escena hasta golpear cada uno de ellos en algún punto de la escena. Dicho punto pertenecerá a alguno de los objetos que forman la escena (Ver figura 9).

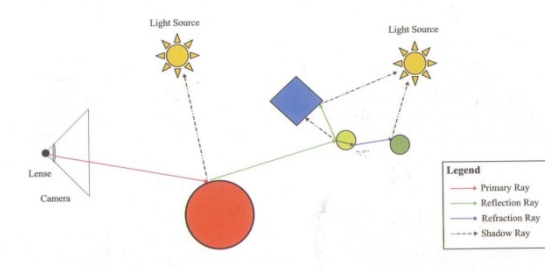


Figura 9. Descripción del algoritmo de trazado de rayos. Imagen extraída de Banterle et al., 2011, p.20

4.3 Rendering basado en la física.

El término “basado en la física” indica el uso de modelos físicos y aproximaciones que tienen en cuenta todas las propiedades ópticas que se producen cuando interacciona la luz con los objetos (dispersión, difracción, reflexión, refracción, absorción, polarización,...), teniendo en cuenta el comportamiento espectral de la luz (la única manera de conseguir colores exactos), las propiedades ópticas de los materiales, las fuentes de luz reales y los entornos.

En este TFG el modelo de iluminación [Magallón, 2003] que se utilizará para obtener los datos numéricos, aparece descrito en el Apéndice 4, denominado “Ecuación de rendering basada en la física”.

Brevemente se puede destacar sobre la implementación de dicho modelo, que éste requiere para calcular la cantidad de luz que llega a un punto de un objeto seleccionado por el algoritmo del trazado de rayos, dos tipos de contribuciones. El primero tiene que

ver con las contribuciones proporcionadas por las fuentes de luz (lo que se denomina “luz directa”) para ello el algoritmo del trazado de rayos requiere disparar desde el punto alcanzado un rayo hacia cada una de las fuentes de luz que se puedan ver desde ese punto. El segundo tipo tiene que ver con las contribuciones del resto de los puntos de la escena (lo que se denomina “luz indirecta”) para ello el algoritmo del trazado de rayos requiere disparar desde el punto alcanzado un conjunto finito de rayos cuyo número y dirección dependerá de las propiedades del material.

Este método permite simular efectos como las sombras, reflejos, refracciones, luz indirecta, dispersión, movimiento, etc. De manera que a través del rendering basado en la física podemos calcular escenas con un nivel de exactitud y detalle extremo.

4.4 Reflexiones

- Una simulación basada en la física parte de datos de entrada que son números reales asociados a longitudes de ondas y se obtienen en cada punto de la escena números reales asociados a las mismas longitudes de onda.
- Dichos valores espectrales en número de (8, 16, 24, 32,...) hay que transformarlos en coordenadas cromáticas seleccionando algún espacio de color. En nuestro caso se han seleccionado los valores tricromáticos CIE 1931 (X, Y, Z), que siguen siendo valores reales. Recordemos que ese espacio se caracteriza por que el valor de la luminancia viene dado por la coordenada Y. Los valores de dicha coordenada pueden variar en el intervalo 10^{-6}cd/m^2 y 10^8cd/m^2 , denominado “alto rango dinámico”.
- Si se dispusiera de un monitor ideal que tuviera una rango dinámico ilimitado, bastaría asignar a cada pixel del dispositivo las mismas coordenadas (X, Y, Z) obtenidas, y posteriormente hacer un cambio de coordenadas a las (R, G, B) del dispositivo. De este modo la imagen generaría la sensación perceptual implícita en el proceso de la simulación. Por ejemplo, los brillos calculados serían directamente los brillos producidos por la pantalla.
- Pero en la actualidad, resulta que el rango de coordenadas CIE tricromáticas del dispositivo sólo admite valores de Y_d comprendidos en el intervalo 0cd/m^2 y 10^2cd/m^2 , denominado “bajo rango dinámico”. De este modo la imagen no podría generar la sensación perceptual implícita en el proceso de la simulación. Como los brillos calculados no pueden ser los brillos producidos por la pantalla entonces la sensación perceptual del ojo no podría ser la misma, por ejemplo en casos de deslumbramiento.

¿Qué hacer si el problema que se pretende resolver requiere que la sensación que produzca la pantalla sea la misma sensación que la que produciría el monitor ideal con rango dinámico ilimitado?

En los últimos años, varios investigadores han invertido tiempo y esfuerzo con objeto de dar respuesta a esa pregunta. La reducción de rango siempre significa “perder información”, pero los algoritmos que se han diseñado intentan “mantener algunas de las características originales” que en cada caso se consideren las más importantes, como por ejemplo el contraste, los detalles, los colores,... etc.

Desde este punto de vista, y teniendo en cuenta la orientación de los diferentes resultados que se pretenden obtener, los sistemas de rendering basados en la física se pueden clasificar del modo siguiente:

- Hay sistemas que pretenden generar imágenes sintéticas que produzcan resultados que mantengan características propias del sistema visual humano antes y después de la reducción de rango.
- Otros sistemas (la mayoría) se centran en mantener por encima de todo “la estética del resultado final”, para ello no intentan copiar el comportamiento del sistema visual humano, sino que intentan copiar el comportamiento de una cámara fotográfica y obtener resultados propios de sus efectos estéticos, antes y después de la reducción de rango. De hecho muchos de estos algoritmos realzan estéticamente los resultados obtenidos de la simulación basada en la física.

El mantenimiento de características tipo sistema visual humano frente a características de cámara fotográfica, requieren algoritmos diferentes debido a las profundas diferencias existentes en el comportamiento de un ojo y una cámara ante la luz que proviene de una misma escena. Algunas diferencias son:

- El ojo tiene un comportamiento muy diferente ante las diferentes longitudes de onda del espectro visible, caracterización que viene dada por la función de sensibilidad del ojo. La cámara tiene un comportamiento prácticamente uniforme e incluso tiene un espectro visual de longitudes de onda mayor (infrarrojo, ultravioleta).
- El rango dinámico del ojo es mayor que el rango dinámico de una cámara.
- El comportamiento del ojo ante la variación de la luminancia viene controlado por la capacidad de adaptación dada por los conos y los bastones, por lo que no es uniforme. El comportamiento de una cámara es mucho más simple.
- La pupila cambia su diámetro entre 7mm y 2mm, este rango de variación produce nada más que una variación de una unidad logarítmica (decimal) en la luminancia que alcanza la retina, por lo que interviene poco en los procesos de adaptación a la luz del ojo, su efecto actúa fundamentalmente para mitigar aberraciones en el sistema óptico del ojo. En el caso de la cámara es uno de los elementos importantes a la hora de conseguir buenas imágenes.
- El ojo ante el color tiene un comportamiento subjetivo mientras que la cámara tiene un comportamiento absoluto (tipo dispositivo de laboratorio).
- Tres son los elementos que permiten ajustar la exposición en fotografía: apertura del diafragma, velocidad de obturación y sensibilidad ISO...

4.5 ¿Qué software utilizar?

Inicialmente, se seleccionó como herramienta de trabajo el paquete 3DsMax, por motivos de ranking, de calidad, de uso y de familiaridad en el entorno del Grado en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto.

Para analizar sus posibilidades hay que hacerlo a la vista de los requerimientos necesarios para realizar la simulación de señalética en túneles en condiciones de emergencia, que son:

- Simulación de la iluminación global basada en física
- Especificación fotométrica espectral de las fuentes de luz a ser posible en formato TM14
- Caracterización óptica de materiales complejos
- Que permita el rendering perceptual
- Que permita realizar diferentes tipos de evaluaciones del campo de iluminación radiométrico obtenido.
- Que permita introducir el comportamiento del humo en la evaluación radiométrica del algoritmo de iluminación global basado en la física

La evolución algorítmica y las prestaciones ofrecidas pueden seguirse en detalle en la dirección web http://es.wikipedia.org/wiki/Autodesk_3ds_Max

Ahora bien, una vez analizados en profundidad los requerimientos necesarios para realizar la simulación de señalética en túneles en condiciones de emergencia y las prestaciones que ofrece la versión más moderna de dicho paquete, el **Autodesk 3ds Max 2013**, la conclusión a la que se llega, ver Apéndice 5, es que no es factible la utilización de esa herramienta de primera línea. Por lo tanto la salida era abandonar la línea de actividad propuesta para el TFG o intentar solventarla. Evidentemente, se decidió seleccionar esta última opción.

Para ello se buscó un entorno de laboratorio digital en el que se pudiera llevar a cabo el planteamiento propuesto, es decir un sistema de simulación de la iluminación basado en la física que reuniera todas las características indicadas. Se tuvo acceso a uno pero en el que las partes que faltaban eran el “rendering perceptual” e introducir el impacto del humo en la evaluación radiométrica. Por ello el firmante de este trabajo, ha dedicado sus esfuerzos a estudiar, seleccionar y algoritmizar los procedimientos necesarios para cubrir esos dos déficits.



5 Generación de imágenes perceptualmente creíbles

En este apartado se introduce el problema de la visualización perceptual conocido en la bibliografía como técnica de reproducción de tono, posteriormente se describe con detalle el operador de reproducción de tono que se ha seleccionado en este TFG. Para ello se analiza con detalle el comportamiento visual del ojo humano y se describe el operador así como su implementación.

5.1 El problema de la visualización perceptual. Alto rango dinámico, bajo rango dinámico y reproducción de tono.

Como ya se indicó en el apartado 4.4, el rango de luminancias o rango dinámico que es capaz de ver un ojo humano varía entre 10^{-6} cd/m² y 10^8 cd/m². Es decir, el ojo es capaz de detectar imágenes con un Alto Rango Dinámico/High Dynamic Range (HDR). Sin embargo el rango de luminancias o rango dinámico que es capaz de representar un monitor CRT o LCD de un computador o un proyector a la hora de visualizar imágenes está muchísimo más limitado. Es decir, el monitor es capaz de representar imágenes con una Bajo Rango Dinámico/Low Dynamic Range (LDR). Ver figura 10.

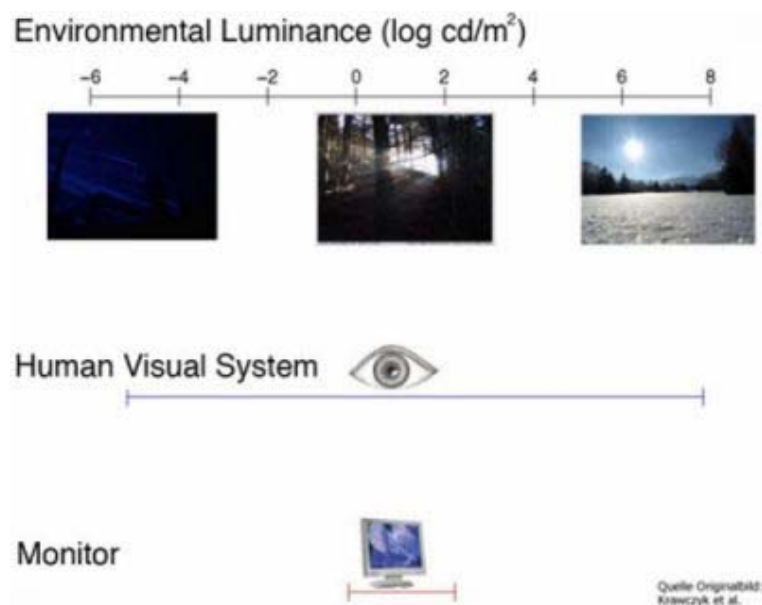


Figura 10. Comparación entre el rango de luminancias que detecta el ojo humano frente al de un monitor. Dado que el intervalo del ojo es gigantesco se representan ambos en escala logarítmica.

Por lo tanto a la hora de representar mediante un dispositivo de bajo rango lo que ve un ojo en la realidad o lo que calcula un computador cuando genera imágenes sintéticas realistas (ambas de alto rango) nos encontramos con el problema de cómo hacerlo para conseguir que la sensación perceptual sea correcta.

En la figura 11 se muestra de manera visual lo que se pretende, obsérvese que lo que se ve en el monitor da la misma sensación que el entorno en el que está inmersa la pantalla a pesar de que los rangos dinámicos son completamente distintos en magnitud.

La respuesta a la pregunta formulada es lo que se denomina “reproducción de tono perceptual”.



Figura 11. Diferentes rangos dinámicos (realidad y monitor), pero la misma sensación perceptual.

El objetivo de la reproducción de tono perceptual es conseguir que un observador perciba de manera similar la imagen calculada y presentada en un monitor de una escena, y la propia escena real. Una vez calculadas las luminancias en la imagen sintética, entonces hay que establecer un procedimiento o algoritmo para desplazar las luminancias calculadas a las luminancias representables por el monitor, y conseguir que la sensación percibida por el observador sea la que se pretende.

Un último detalle que hay que tener en cuenta en relación con el monitor es que dadas las tecnologías existentes a la hora de generar las mismas luminancias en los canales RGB de cada píxel los voltajes que se deben aplicar no son las mismas, y nuevamente hay que realizar una pequeña corrección que se denomina corrección gamma (γ) cuyo valor suele estar comprendido en el intervalo [2.2, 2.4].

- Si RGB indica el color rojo, verde y azul de un píxel de un monitor. Los subíndices (df) indican color final a representar en el monitor y los subíndices (dc) indican color calculado para el monitor. La corrección gamma viene dada por:

$$\begin{matrix} R_{df} & R_{dc}^{\gamma} \\ G_{df} & G_{dc}^{\gamma} \\ B_{df} & B_{dc}^{\gamma} \end{matrix} =$$

5.1.1 Alto rango dinámico/HDR (resultados de la simulación)

1º El sistema de simulación de la iluminación basado en la física, genera como resultados de salida, para cada pixel de la imagen sintética, una función espectral de radiancia que se denominará $L(x, \lambda)$.

2º Con dicha función espectral de radiancia $L(x, \lambda)$, se calcularán las coordenadas de color CIE 1931 $X(x)$, $Y(x)$, $Z(x)$.

3º. Dichos valores $X(x)$, $Y(x)$, $Z(x)$ son números reales normalmente expresados en doble precisión (HDR) que son los valores que se van a utilizar para realizar los cálculos de rendering perceptual objeto del PFG.

5.1.2 Bajo rango dinámico/LDR (datos de monitores)

Se ha considerado en este TFG que el rango dinámico de los monitores está comprendido entre el intervalo $[0-200]$ cd/m^2 . Siendo el valor medio de 100 cd/m^2 .

5.1.3 Reproducción de tono. Estado del arte

El estado del arte utilizado se ha obtenido a partir del libro de Banterle et al. 2011. En dicha publicación los diferentes algoritmos publicados hasta el año de dicha publicación se clasifican en dos grandes bloques, que a su vez se subclasifican en cuatro tipos.

Los dos bloques se denominan “Empíricos” y “Perceptuales”. Los empíricos tienen como objetivo conseguir el mayor placer estético buscando la mejora de lo que se haya captado normalmente con una cámara. Los perceptuales pretenden copiar algunos de los aspectos que caracterizan al ojo humano e intentan representar lo que un ojo vería, en las diferentes situaciones en las que pueda estar inmerso.

Las subcategorías son las mismas para los dos bloques y se denominan:

- Algoritmos (operadores) globales. El operador una vez definido se aplica el mismo a todos los valores calculados o capturados para la imagen.
- Algoritmos (operadores) locales. El operador depende del pixel.
- Algoritmos (operadores) en el espacio frecuencia. Operadores diferentes para zonas de baja o alta frecuencia de la imagen.
- Algoritmos (operadores) de segmentación. Operadores diferentes para diferentes “partes de la imagen”

A todo lo anterior se le puede añadir la supercategoría relacionada con la evolución en el tiempo de dichas imágenes es decir, estáticas o dinámicas.

El método que se ha seleccionado para este TFG se basa fundamentalmente en el trabajo de Ferwerda et al. 1996, complementado por algunos datos que aparecen en Duran et al. 2000 y Pattanaik et al. 1998.

Desde el punto de vista de la clasificación citada, el trabajo de Ferwerda et al. define un operador “perceptual”, “global”, “estático y dinámico”.

Los motivos para seleccionarlo son los siguientes: reúne los requisitos que se necesitan para la este TFG, desde el punto de vista de los conocimientos del autor es el algoritmo más objetivo ya que no ofrece parámetros modificables por el usuario, además de tener una complejidad razonable que ha permitido al autor lograr entenderlo y planificar un algoritmo en base a los conocimientos recibidos durante la formación del Grado de Diseño Industrial y Desarrollo de Producto en la Universidad de Zaragoza.

5.2 Operador de reproducción de tono (Ferwerda et al. 1996)

Una función importante del ojo es su capacidad para adaptarse a distintos grados de iluminación. La entrada de luz está regulada por la pupila que puede producir midriasis (para aumentar la entrada de luz) o miosis (para disminuirla), pero la adaptación a la iluminación tiene lugar fundamentalmente en los foto receptores.

El objetivo de la síntesis realista de imágenes es producir imágenes que capturan la apariencia visual de escenas modeladas. Los métodos de renderizado basados en la física hacen posible la simulación precisa de la distribución de los niveles de luz en escenas, pero la precisión física en el renderizado no garantiza que las imágenes expuestas tengan una apariencia perceptual visual realista. Hay dos razones para esto, primero, el rango de energía lumínica en una escena puede ser sustancialmente diferente con el rango de energía lumínica que el dispositivo pueda producir. Segundo, los estados visuales “adaptación” del observador de la escena y “adaptación” del observador del dispositivo pueden ser también muy distintos.

Desde el punto de vista del conocimiento del autor y sus directores, muy poco trabajo se ha realizado en el mundo del diseño sobre la visualización perceptualmente realista de imágenes, y puede ser muy útil en diferentes situaciones como se mostrará en este trabajo.

5.2.1 Comportamiento visual del ojo humano

En general la percepción de una escena de ARD depende en gran medida de las condiciones de iluminación.

El modelo captura cambios en el umbral de la visibilidad, apariencia de color, agudeza visual, sensibilidad a lo largo del tiempo causada por los mecanismos de adaptación del sistema visual. Se usa el modelo para exponer los resultados de simulaciones de iluminación global, iluminadas en intensidades que van desde luz diurna a luz de estrellas. Debido a que el modelo está basado en datos psicofísicos puede ser usado para predecir la visibilidad y apariencia de escenas.

Como ya se ha indicado, el rango de energía lumínica que experimentamos a lo largo de un día es muy amplio. La luz diurna puede ser 10 millones de veces más intensa que la luz nocturna.

La figura 12 muestra el rango de luminosidades que encontramos en un entorno natural y resume algunos de los parámetros visuales asociados con este rango lumínico de casi 14 unidades logarítmicas. Nuestro sistema visual se las arregla con este gran rango de luminosidad adaptándose a las condiciones de iluminación dominantes.

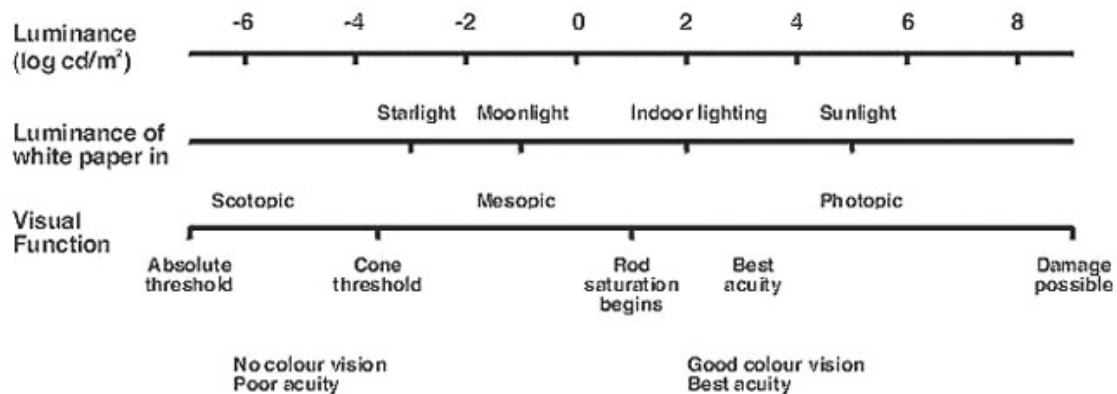


FIGURA 12. El rango de luminancias en un entorno natural y asociado a parámetros visuales (Hood 1986). Obsérvese que el rango es de aproximadamente 14 unidades logarítmicas.

La adaptación se consigue mediante la acción coordinada de procesos mecánicos, fotoquímicos y neurológicos en el sistema visual. La pupila, los conos y bastones, el blanqueamiento y regeneración de los receptores de fotopigmentos y los cambios en el proceso neurológico tienen todos un rol en la adaptación visual.

Aunque la adaptación provee de función visual sobre un amplio rango de intensidades ambientales, esto no significa que veamos igual de bien en todos los niveles de intensidad. Por ejemplo, con poca luz nuestros ojos son muy sensibles, y somos capaces de detectar pequeñas diferencias en la luminosidad, sin embargo, nuestra agudeza para detectar detalles en los patrones y nuestra habilidad para distinguir colores son muy pobres. Es por esto que es tan difícil leer un periódico al ocaso o elegir el par correcto de calcetines por la noche. Por otro lado, durante el día tenemos una visión más aguda respecto a colores, pero nuestra sensibilidad absoluta es mucho menor y las diferencias de luminosidad tienen que ser mayores para poder ser detectadas. Por último, el proceso de adaptación no ocurre de manera instantánea.

Para producir imágenes sintéticas realistas que capturen la apariencia actual de una escena, se necesita tener en cuenta los cambios relacionados con la adaptación. El modelo seleccionado predice la visibilidad de objetos y colores a ciertos niveles de iluminación y simula los cambios de visibilidad y apariencia que ocurren en un tiempo dado.

Experimentos en los que se basa el modelo

En esta sección se va hablar de una serie de experimentos que miden los cambios en la función visual. Los resultados de estos experimentos sirven como base para el modelo computacional que se va a aplicar en este TFG, otros resultados interesantes pueden verse en el Apéndice 6 titulado “Otros experimentos que describen el comportamiento del ojo”.

El **experimento principal** está relacionado con los resultados obtenidos que muestran los cambios en el umbral de la sensibilidad. Los resultados aparecen en la figura 13.

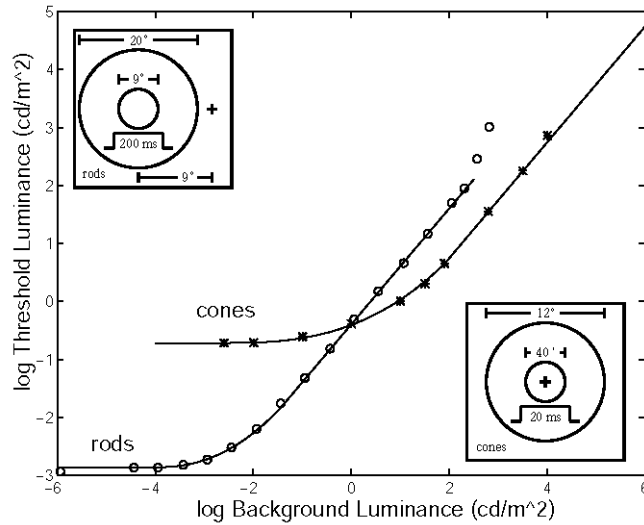


FIGURA 13, Modelo psicofísico de detección de umbrales sobre el rango completo de visión para conos y bastones. Las curvas muestran el menor incremento de luminancia necesario para distinguir un círculo (eje de ordenadas) sobre un fondo uniforme con luminancia L_a prefijada (eje de abscisas). El experimento se realiza variando sucesivamente la luminancia del fondo.

Mientras la luminancia del fondo en un experimento de detección del umbral se incrementa desde cero, la diferencia de luminancia entre el fondo y el objetivo necesario para detectarlo aumenta de manera directamente proporcional a la luminancia del fondo. Estas gráficas aparecen denominadas en la literatura como “*threshold vs intensity (t.v.i) functions*”, que en esta memoria se denominará T_p para los conos y T_s para los bastones. Las fórmulas matemáticas que describen cada una de esas funciones son las siguientes:

$$\text{Log}_{10} T_p(L_a) = \begin{cases} -0.72 & \text{si } \text{Log}_{10} L_a \leq -2.6 \\ \text{Log}_{10} L_a - 1.255 & \text{si } \text{Log}_{10} L_a \geq +1.9 \\ (0.249 \text{Log}_{10} L_a + 0.65)^{2.7} - 0.72 & \text{para el resto de los valores} \end{cases}$$

$$\text{Log}_{10} T_s(L_a) = \begin{cases} -2.86 & \text{si } \text{Log}_{10} L_a \leq -3.94 \\ \text{Log}_{10} L_a - 0.395 & \text{si } \text{Log}_{10} L_a \geq -1.44 \\ (0.405 \text{Log}_{10} L_a + 1.6)^{2.18} - 2.86 & \text{para el resto de los valores} \end{cases}$$

Como se aprecia en la gráfica los conos y los bastones tienen un comportamiento lineal (ley de Webber (Riggs 1971) a partir de ciertos valores, por otro lado, una importante diferencia es que los conos no se saturan mientras que los bastones sí.

El **segundo experimento** tiene que ver con los cambios en la apariencia del color. La sensibilidad espectral de los sistemas de conos y bastones están descritos por la funciones de luminosidad escotópica, fotópica y mesópica.

Se muestran por separado en la figura 14 y de forma global en la figura 15

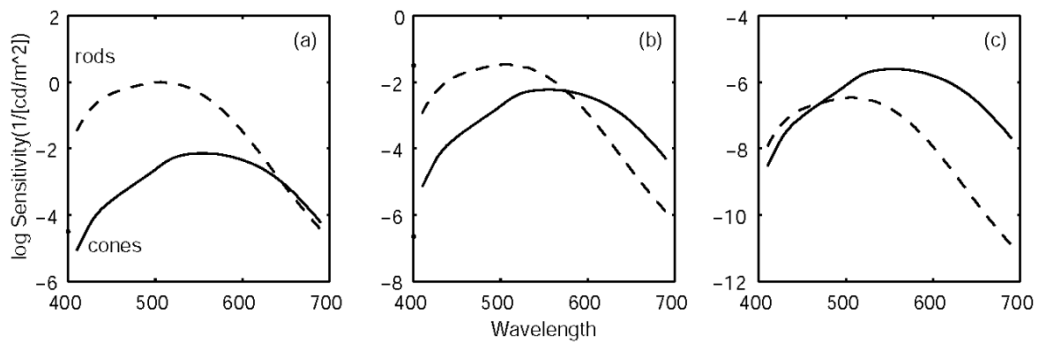


Figura 14. Cambios en la visibilidad espectral del sistema visual en niveles de iluminación a) escotópicos, b) mesópicos y c) fotópicos. (Hood 1986) $1/\text{umbral} = \text{sensibilidad}$

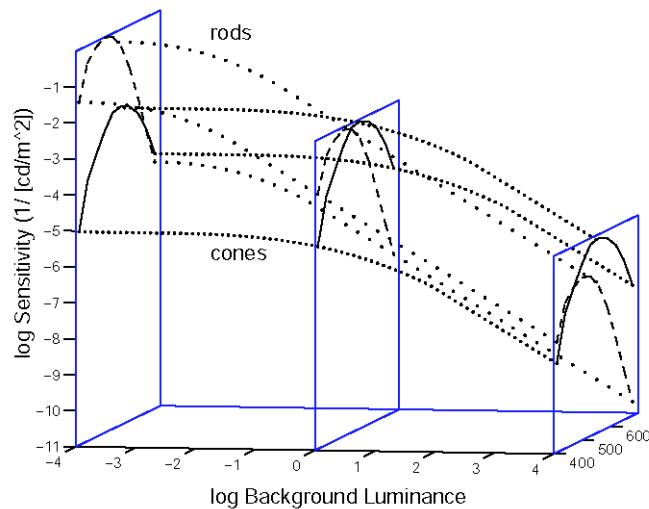


Figura 15. La figura 14 en forma 3D. Modelo de la sensibilidad del umbral como función de la longitud de onda, luminancia del fondo para los sistemas de conos y bastones.

Puede observarse que a niveles de luminancia bajos la visión es acromática ya que la detección en todas las longitudes de onda viene dada por los bastones. Conforme el nivel de luminancia se incrementa a niveles mesópicos el sistema de conos se activa y los colores empiezan a ser vistos empezando por los rojos de onda larga y progresando a los verdes de onda media. Solo a luminancia alta los colores azules de onda corta empiezan a aparecer.

El **tercer experimento** tiene que ver con los cambios en la agudeza visual. La agudeza visual (acuity) es la medida de la habilidad del sistema visual para resolver el detalle espacial. La agudeza es menor a niveles de iluminación escotópica que a niveles fotópica. En la figura 16 se muestra el cambio en la agudeza visual representada como una función dependiente de la luminancia del fondo.

Esta curva puede ser usada para predecir la visibilidad de detalles a diferentes niveles de iluminación en una escena.

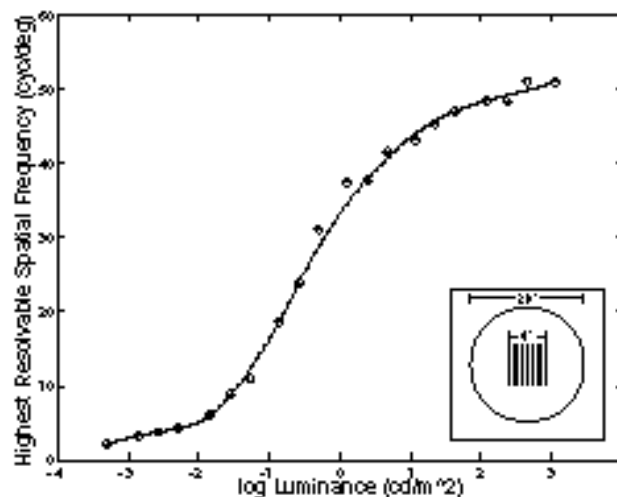


Figura 16. Variación de la agudeza visual como función de la luminancia del fondo (Shaler 1937).

Resumen

Los conocimientos que se muestran sobre el concepto de adaptación indican que el sistema visual es sensible a una gran cantidad de niveles de luz ambiental aun con los límites en los rangos dinámicos que las unidades neuronales que forman el sistema tienen individualmente. Sin embargo, esto no significa que veamos igual de bien en todos los niveles de iluminación. Los experimentos demuestran que el umbral de visibilidad, la apreciación el color y la agudeza visual son diferentes cuando cambian los niveles de iluminación.

5.2.2 Descripción del operador

En este apartado se van a utilizar los resultados de los experimentos previos para definir el operador de reproducción de tono basado en el trabajo de Ferwerda et al. 1996

Problema:

- Datos de entrada. Se tiene una imagen numérica virtual del mundo obtenida por simulación, de la que se conoce en cada pixel (x) el valor numérico de las coordenadas CIE 1931, ($X(x)$, $Y(x)$, $Z(x)$) en alto rango dinámico.
- Datos de salida. Se quiere calcular para cada pixel de la pantalla de un computador que es de bajo rango dinámico, las coordenadas en el espacio de color RGB, (r , g , b) de manera que la imagen obtenida produzca la sensación perceptual adecuada.
- El problema que surge es como asociar los valores (r , g , b) a partir de los valores (X, Y, Z) teniendo en cuenta que el rango de luminancias del mundo y el rango de luminancias del monitor son muy diferentes, ver figura 10.

Nomenclatura utilizada:

- L valores de luminancia
- Subíndices
 - w hace referencia a la imagen virtual del mundo (*world* en inglés)
 - d hace referencia al monitor (*display* en inglés)
 - p hace referencia al rango fotópico (*photopic* en inglés)
 - s hace referencia al rango escotópico (*scotopic* en inglés)
 - a hace referencia a adaptación (*adaptation* en inglés)
 - r, g, b hace referencia a rojo, verde y azul (*red, green, blue* en inglés)

Caracterización del comportamiento del sistema visual humano (ver apartado 5.2.1 experimento uno):

$$\text{Log } T_p(L_a) = \begin{cases} -0.72 & \text{si } \text{Log}_{10} L_a \leq -2.6 \\ \text{Log}_{10} L_a - 1.255 & \text{si } \text{Log}_{10} L_a \geq +1.9 \\ (0.249 \text{Log}_{10} L_a + 0.65)^{2.7} - 0.72 & \text{para el resto de los valores} \end{cases}$$

$$\text{Log}_{10} T_s(L_a) = \begin{cases} -2.86 & \text{si } \text{Log}_{10} L_a \leq -3.94 \\ \text{Log}_{10} L_a - 0.395 & \text{si } \text{Log}_{10} L_a \geq -1.44 \\ (0.405 \text{Log}_{10} L_a + 1.6)^{2.18} - 2.86 & \text{para el resto de los valores} \end{cases}$$

Caracterización del monitor:

- (x) un pixel cualquiera del monitor
- $L_{da} = \text{Luminancia de adaptación al display} = 0.5 * L_{dmax}$
 - teniendo en cuenta que
 - $L_{dmax} = \text{Luminancia máxima alcanzable por el monitor}$

Caracterización del mundo a partir de los resultados obtenidos de la simulación física:

- (x) un pixel cualquiera de la imagen obtenida a partir de la simulación
- $L_{wa} = \text{Luminancia de adaptación al mundo} = 10^{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_{10}(L_w(x_i))}$ *Media logarítmica decimal de la luminancia virtual calculada,*
 - *teniendo en cuenta que*
 - $L_w(x) = Y_w(x)$

Idea del método para calcular de la Luminancia para cada pixel (x) del monitor a partir del valor de la luminancia calculada del pixel (x) correspondiente de la imagen simulada (mundo).

- Si sólo hubiera un tipo de células nerviosas $L_d(x) = m * L_w(x)$
 - *siendo $m = \text{un factor que relaciona las luminancias}$* que dependerá para cada situación particular de los valores seleccionados (L_{wa}, L_{da}) en base al comportamiento del sistema visual humano.
- Como hay dos tipos de células nerviosas, entonces
 - Para los conos $L_d(x) = L_{dp}(x)$ y $m = m_p$ (visión fotópica)
 - $L_{dp}(x) = m_p * L_{wp}(x)$
 - Para los bastones $L_d(x) = L_{ds}(x)$ y $m = m_s$ (visión escotópica)
 - $L_{ds}(x) = m_s * L_{ws}(x)$
- Como se quiere tener en cuenta también la visión mesópica entonces
 - $L_d(x) = L_{dp}(x) + K(L_a) * L_{ds}(x)$
 - $k(L_a) = \text{valor entre } [0, 1]$
 - $k(L_a) = \left(1 - \frac{\frac{L_{wa}-0.01}{2}}{(10-0.01)}\right)^2 \text{ clamped}$

Método completo para todo el rango de luminancias (escotópica, mesópica, fotópica)

- $L_d(x) = L_{dp}(x) + K(L_a) * L_{ds}(x)$
 - $k(L_a) = \text{valor entre } [0, 1]$
 - $k(L_a) = \left(1 - \frac{\frac{L_{wa}-0.01}{2}}{(10-0.01)}\right)^2 \text{ clamped}$
 - *donde*
 - $L_{dp}(x) = m_p(L_{wa}, L_{da}) * L_{wp}(x)$
 - $L_{ds}(x) = m_s(L_{wa}, L_{da}) * L_{ws}(x)$
 - *siendo*
 - $m_p(L_{wa}, L_{da}) = \frac{T_p(L_{da})}{T_p(L_{wa})}$
 - $m_s(L_{wa}, L_{da}) = \frac{T_p(L_{da})}{T_s(L_{wa})}$
- *Teniendo en cuenta que*
 - $L_{wp}(x) = \text{Luminancia del mundo fotópica} = Y_w(x)$
 - $L_{ws}(x) = \text{Luminancia del mundo escotópica, es un escalar}$

- $= -0.702 * X_w(x) + 1.039 * Y_w(x) + 0.433 * Z_w(x)$
- Siendo
 - $X_w(x) = \text{Coordenada CIE 1931} - X, \text{ para el pixel } (x)$
 - $Y_w(x) = \text{Coordenada CIE 1931} - Y, \text{ para el pixel } (x)$
 - $Z_w(x) = \text{Coordenada CIE 1931} - Z, \text{ para el pixel } (x)$
- Reuniendo todas las expresiones se obtiene el operador final de cálculo
 - $X_d(x) = m_p(L_{wa}, L_{da}) * X_w(x) + K(L_a) * L_{ws}(x)$
 - $Y_d(x) = m_p(L_{wa}, L_{da}) * Y_w(x) + K(L_a) * L_{ws}(x)$
 - $Z_d(x) = m_p(L_{wa}, L_{da}) * Z_w(x) + K(L_a) * L_{ws}(x)$
- El paso final es

$$\begin{pmatrix} r_d(x) \\ g_d(x) \\ b_d(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.24103 & -1.53741 & -0.49862 \\ -0.969242 & 1.87596 & 0.041555 \\ 0.055632 & -0.203979 & 1.05698 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X_d(x) \\ Y_d(x) \\ Z_d(x) \end{pmatrix}$$

5.2.3 Implementación del operador

Dada la extensión permitida para las memorias de PFG en la EINA de la U.Z. Se describe en el Apéndice 7 denominado “Implementación del algoritmo” el operador de reproducción de tono utilizado en este TFG. La descripción del algoritmo completo y de todas las funciones auxiliares se han expresado en pseudocódigo con objeto de que no dependa su lectura del conocimiento de ningún lenguaje de programación concreto. Teniendo en cuenta además que la formación del autor de la memoria está relacionada con el lenguaje Pascal.

6 Aplicación al caso de un túnel. Especificaciones de la escena y resultados

6.1. Especificación de la escena

Los elementos que describen la simulación del comportamiento visual de un usuario en un túnel en situaciones normales y críticas son los siguientes:

- Túnel
- Señales
- Usuario
- Situaciones

6.1.1 Túnel

- Descripción geométrica del túnel
 - 1000 metros de longitud
 - Sección rectangular de 16 x 6 metros
 - 4 carriles de 3.5 metros (14m de calzada)
 - 2 arcenes/aceras de 1m
 - 1 solo tubo (sin separación entre sentidos)
 - Una salida de emergencia cada 250 m
 - Una estación de emergencia (teléfono + extintores) cada 150m
 - Marcas en la calzada y en el arcén cada 2 m
 - Colores en las paredes hasta 1,5 m desde el suelo
- Descripción de las luminarias
 - En los primeros 75 m las luminarias están colocadas cada 1,5 m.
 - En los siguientes 100 m las luminarias están colocadas cada 3 m.
 - En el centro del túnel cada 10 metros.
 - Los modelos de luminarias usados son 3 de indalux [catálogo de iluminación técnica]:
 - IZT3 -1
 - IZT3-
 - IZT6-1

- Descripción del perfil de iluminación de un túnel (ver Figura 17 - Apéndice 10)

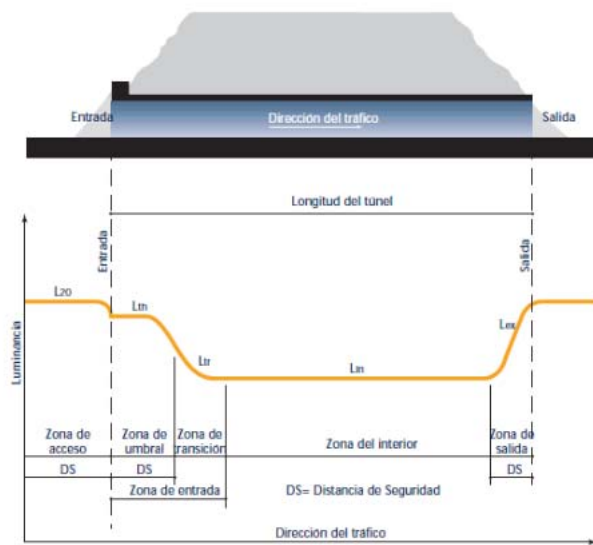


Figura 17

Descripción del perfil de iluminación del túnel simulado

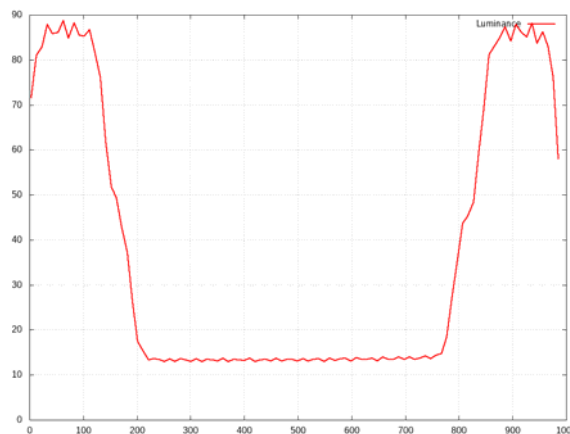


Figura 18. Perfil de iluminación del

túnel simulado

Los valores que aparecen en la figura 17 para el túnel simulado son:

- La velocidad se limita a 80 km/h
La distancia de seguridad (visibilidad) es $DS = 100\text{m}$
- La iluminación exterior diurna en la zona de entrada depende de los edificios que haya, pero una estimación es de 3000 cd/m^2 .
- La zona de acceso es de longitud $DS = 100\text{m}$
- La zona de entrada es la zona de umbral de longitud $DS = 100$ más zona de transición de longitud 100m de largo y tiene una luminancia de 200 cd/m^2 de cara al conductor.
- La zona interior debe tener una luminancia de unas 15 cd/m^2

- Comentarios

- Como el túnel es simétrico, el perfil es simétrico.
- En condiciones nocturnas hay que mantener una luminancia de unos 3-5 cd/m^2 en el interior (en este caso se puede conseguir haciendo que una de cada 10 luminarias se quede encendida por la noche).
- La iluminación para evacuación debe ser de al menos 0.2 cd/m^2 .
- Las imágenes se han realizado con la cámara a una distancia de entre 105 y 125 metros de la entrada del túnel.
- La altura de la cámara se sitúa a 1 metro para las imágenes desde el punto de vista del conductor y a 1,6 metros para las imágenes de pie.

- Caracterización óptica de la calzada y del cemento

- La calzada es un asfalto estándar R3, con un valor de reflectancia total de 0.07
- La acera es un material difuso con un coeficiente de 0.1

6.1.2 Señales

Las señales elegidas se han obtenido del catálogo de la empresa IMPLASER (catálogo IMPLASER).

Elementos usados:

- Kit puerta TN14
- Paneles TN15, TN16, TN17
- Señalización Implaled 300, banderola.
- Señalización de las distancias de la salida de emergencia anterior y posterior cada 20m, a 1.5m de altura.

Tecnología de señal Implaled (ver apéndice 8)



Figura 19. Señal con tecnología Implaled

Este sistema de señalización internamente iluminado y de alta fotoluminiscencia está diseñado para su instalación en lugares en los que existe una total oscuridad o donde la iluminación es insuficiente para excitar el material fotoluminiscente convencional como, por ejemplo, túneles, travesías, etc.

6.1.3 Usuario

En este trabajo fin de grado se modela el comportamiento fisiológico del ojo de un ser humano (en base a conos y bastones), sometido a un conjunto de experimentos, que posteriormente se describirán. Se supondrá un individuo medio con un estado psicológico no alterado. Aunque sabemos que el comportamiento psicológico de un individuo medio en situaciones de emergencia está alterado.

El punto de vista del usuario se corresponde con las siguientes situaciones:

- Como si estuviera sentado en un coche
- De pie

6.1.4 Situaciones analizadas

Todos los resultados que se indican en las tablas [2-5] pueden encontrarse en el CD que acompaña este TFG.

- La tabla 2 corresponde al reproductor de tono de Ferwerda
- La tabla 3 corresponde al reproductor de tono trivial $m=1$ (ver apéndice 11)
- La tabla 4 corresponde al reproductor de tono basado en el valor medio (ver apéndice 11)
- La tabla 5 corresponde al reproductor de tono basado en el promedio logarítmico (ver apéndice 11)
- La tabla 6 corresponde al reproductor de tono tipo estético de Reinhard

Estos otros reproductores de tono se han usado para comparar y demostrar que el reproductor de tono de Ferwerda es el más adecuado para este TFG.

Reproductor de tono Ferwerda	Conductor y Túnel con luces	Conductor y túnel sin luces	De pie y túnel con luces	De pie y túnel sin luces
Sin humo	x	x	x	x
Con humo (0,2)*	x	x	x	x
Con humo (0,3)*	x	x	x	x
Con humo (0,4)*	x	x	x	X

Tabla 2

X=15 imágenes

* Coeficiente de absorción

Reproductor de tono 1.	Conductor y Túnel con luces	Conductor y túnel sin luces	De pie y túnel con luces	De pie y túnel sin luces
Sin humo	x	x	x	x
Con humo (0,2)*	x	x	x	x
Con humo (0,3)*	x	x	x	X
Con humo (0,4)*	x	x	x	X

Tabla 3

Reproductor de tono 2	Conductor y Túnel con luces	Conductor y túnel sin luces	De pie y túnel con luces	De pie y túnel sin luces
Sin humo	x	x	x	x
Con humo (0,2)*	x	x	x	x
Con humo (0,3)*	x	X	x	x
Con humo (0,4)*	x	x	x	x

Tabla 4

Reproductor de tono 3	Conductor y Túnel con luces	Conductor y túnel sin luces	De pie y túnel con luces	De pie y túnel sin luces
Sin humo	x	x	x	x
Con humo (0,2)*	x	x	x	x
Con humo (0,3)*	x	x	X	X
Con humo (0,4)*	x	x	x	x

Tabla 5

Reproductor de tono estético	Conductor y Túnel con luces	Conductor y túnel sin luces	De pie y túnel con luces	De pie y túnel sin luces
Sin humo	2	2	-	-
Con humo (0,2)*	-	-	-	-
Con humo (0,3)*	-	-	-	-
Con humo (0,4)*	-	-	-	-

Tabla 6

6.2 Resultados 1. Imágenes perceptuales en un ambiente normal

Conductor, y túnel con luces (ver CD Carpeta img-00 – Carpeta tn-4 – fwd)

- El nivel de detalle de la visión es elevado. Esto se puede observar en la granularidad de la calzada y también en los detalles de las paredes.
- Todos los colores se ven nítidos
- Las señales son visibles:
 - Las figuras de las señales están bien contrastadas
 - Las letras de las señales contrastan menos por la distancia a la que se encuentra el observador pero el mensaje está muy claro (ver figura 20)
- El túnel aparece visualmente definido
- Los brillos en el techo y las paredes se detectan.
- El alcance de la visión es muy elevado, de hecho el final del túnel se detecta



Figura 20.



Figura 21.

De pie y túnel con luces (ver CD Carpeta img-02 – Carpeta tn-4 – fwd)

- El nivel de detalle de la visión es elevado. Esto se puede observar en la granularidad de la calzada y también en los detalles de las paredes.
- Todos los colores se ven nítidos
- Las señales son visibles:
 - Las figuras de las señales están bien contrastadas
 - Las letras de las señales contrastan perfectamente (ver figura 23)
- El túnel aparece visualmente definido
- Los brillos en el techo y las paredes se detectan.
- El alcance de la visión es muy elevado, de hecho el final del túnel se detecta



Figura 22.



Figura 23.

6.3 Resultados 2. Imágenes perceptuales en caso de incidentes

6.3.1 Apagón

Conductor, y túnel sin luces (ver CD Carpeta img-01 – Carpeta tn-4 – fwd)

- El nivel de detalle de la visión ha disminuido sustancialmente. Esto se puede observar en la desaparición de la granularidad de la calzada y el detalle de la pared.
- Los únicos colores que se ven nítidos son los de las señales
- Las señales son visibles:
 - Las figuras de las señales están bien contrastadas
 - Las letras de las señales contrastan menos por la distancia a la que se encuentra el observador pero el mensaje está muy claro (ver figura 24)
- El túnel aparece visualmente indefinido, salvo la zona cercana a las señales.
- El alcance de la visión es muy elevado, de hecho el final del túnel se detecta.



Figura 24.

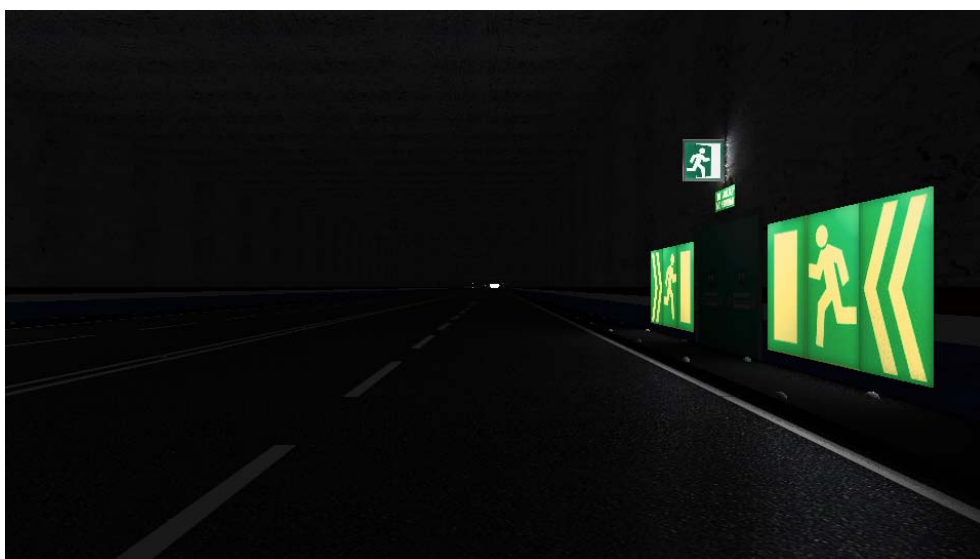


Figura 25.

De pie y túnel sin luces (ver CD Carpeta img-03 – Carpeta tn-4 – fwd)

- El nivel de detalle de la visión ha disminuido sustancialmente. Esto se puede observar en la desaparición de la granularidad de la calzada y el detalle de la pared.
- Los únicos colores que se ven nítidos son los de las señales
- Las señales son visibles:
 - Las figuras de las señales están bien contrastadas
 - Las letras de las señales contrastan perfectamente (ver figura 27)
- El túnel aparece visualmente indefinido
- El alcance de la visión es muy elevado, de hecho el final del túnel se detecta



Figura 26.



Figura 27.

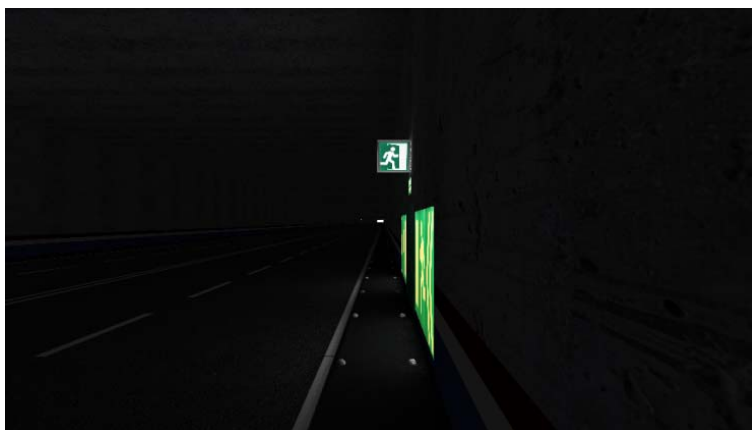


Figura 28.

6.3.2 Con humo (0,2) con luces

Conductor y túnel con luces (ver CD Carpeta img-04 – Carpeta tn-4 – fwd)

- El nivel de detalle de la visión ha disminuido. Sin embargo aun se puede observar la granularidad de la calzada y también los detalles de las paredes.
- Todos los colores han perdido algo de nitidez
- Las señales son visibles:
 - Las figuras de las señales mantienen el contraste
 - Las letras de las señales contrastan menos por la distancia a la que se encuentra el observador pero el mensaje está muy claro (ver figura 29)
- El túnel aparece visualmente indefinido
- Los brillos en el techo y las paredes se detectan menos.
- Se ha perdido mucho alcance de visión, de manera que ya no solo no se ve el final del túnel sino que a partir de los 14-16 metros ya no se ve ni la calzada ni las señales ni la puerta de emergencia que antes sí se veía.



Figura 29



Figura 30

De pie y túnel con luces (ver CD Carpeta img-05 – Carpeta tn-4 – fwd)

- El nivel de detalle de la visión ha disminuido. Sin embargo aun se puede observar la granularidad de la calzada y también los detalles de las paredes.
- Todos los colores han perdido algo de nitidez
- Las señales son visibles:
 - Las figuras de las señales mantienen el contraste
 - Las letras de las señales contrastan perfectamente (ver figura 32)
- El túnel aparece visualmente indefinido
- Los brillos en el techo y las paredes se detectan menos.
- Se ha perdido mucho alcance de visión, de manera que ya no solo no se ve el final del túnel sino que a partir de los 14-16 metros ya no se ve ni la calzada ni las señales ni la puerta de emergencia que antes sí se veía.



Figura 31



Figura 32



Figura 33

6.3.3 Con humo (0,3) con luces

Conductor, y túnel con luces (ver CD Carpeta img-12 – Carpeta tn-4 – fwd)

- El nivel de detalle de la visión ha disminuido más. Sin embargo aun se pueden observar la granularidad de la calzada y también los detalles de las paredes.
- Todos los colores han perdido algo más de nitidez.
- Las señales son visibles:
 - Las figuras de las señales pierden algo de contraste
 - Las letras de las señales contrastan menos pero el mensaje está claro (ver figura 34)
- El túnel aparece visualmente indefinido
- Los brillos en el techo y las paredes ya no se detectan.
- Se ha perdido mucho alcance de visión, de manera que ya no solo no se ve el final del túnel sino que a partir de los 8-10 metros ya no se ve ni la calzada ni las señales.



Figura 34



Figura 35

De pie y túnel con luces (ver CD Carpeta img-13 – Carpeta tn-4 – fwd)

- El nivel de detalle de la visión ha disminuido. Sin embargo aun se puede observar la granularidad de la calzada y también los detalles de las paredes.
- Todos los colores han perdido algo más de nitidez
- Las señales son visibles:
 - Las figuras de las señales mantienen el contraste
 - Las letras de las señales contrastan perfectamente si estás cerca (ver figura 37)
- El túnel aparece visualmente indefinido
- Los brillos en el techo y las paredes se detectan menos.
- Se ha perdido mucho alcance de visión, de manera que ya no solo no se ve el final del túnel sino que a partir de los 8-10 metros ya no se ve ni la calzada ni las señales ni la puerta de emergencia que antes si se veía.



Figura 36



Figura 37



Figura 38

6.3.4 Con humo (0,4) con luces

Conductor, y túnel con luces (ver CD Carpeta img-08 – Carpeta tn-4 – fwd)

- El nivel de detalle de la visión ha disminuido mucho más. Sin embargo aun se pueden observar la granularidad de la calzada y también los detalles de las paredes a corta distancia.
- Todos los colores han perdido mucha nitidez.
- La visibilidad de las señales está muy condicionada por la distancia a la misma y el tamaño:
 - Obsérvese la diferencia entre las dos figuras
 - Se intuyen letras en las señales pequeñas (ver figura 39)
- El túnel aparece visualmente indefinido
- Los brillos en el techo y las paredes ya no se detectan.
- Se ha perdido mucho alcance de visión, de manera que ya no solo no se ve el final del túnel sino que a partir de los 4-6 metros ya no se ve ni la calzada ni las señales.



Figura 39



Figura 40

De pie y túnel con luces (ver CD Carpeta img-09 – Carpeta tn-4 – fwd)

- El nivel de detalle de la visión ha disminuido mucho más. Sin embargo aun se pueden observar la granularidad de la calzada y también los detalles de las paredes a corta distancia.
- Todos los colores han perdido mucha nitidez.
- La visibilidad de las señales está muy condicionada por la distancia a la misma y el tamaño:
 - Obsérvese la diferencia entre las figuras
 - Las letras se leen si se está muy cerca (ver figura 42)
- El túnel aparece visualmente indefinido
- Los brillos en el techo y las paredes ya no se detectan.
- Se ha perdido mucho alcance de visión, de manera que ya no solo no se ve el final del túnel sino que a partir de los 4-6 metros ya no se ve ni la calzada ni las señales.



Figura 41

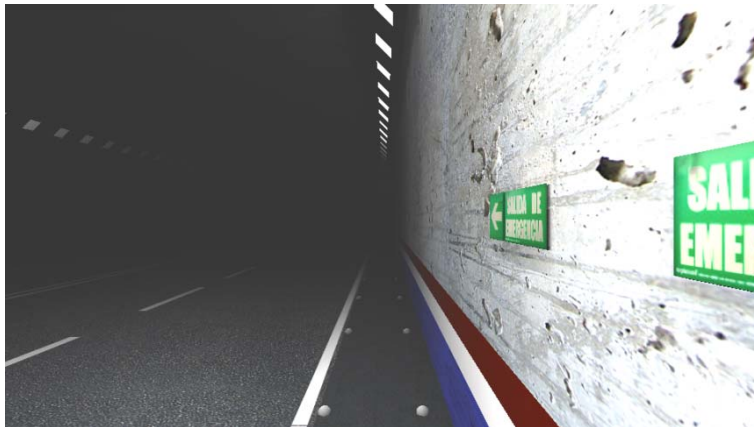


Figura 42

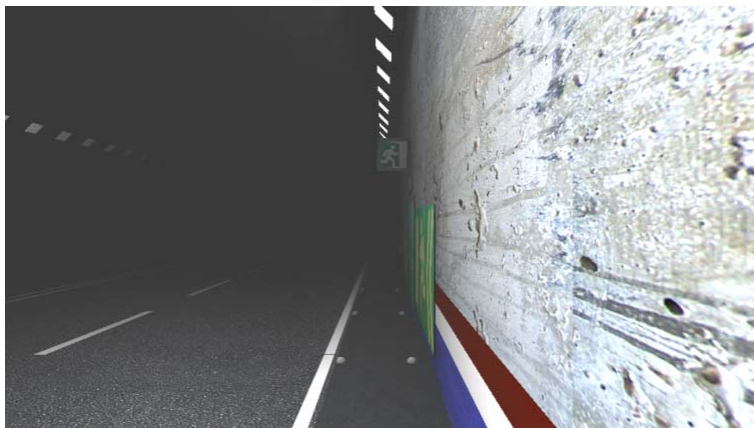


Figura 43

6.3.5 Con humo (0,2) sin luces

Conductor, y túnel sin luces (ver CD Carpeta img-06 – Carpeta tn-4 – fwd)

- El nivel de detalle de la visión es nulo.
- Todos los colores han desaparecido, excepto los de las señales, donde la saturación del tono verde ha disminuido.
- Las señales son visibles:
 - Las figuras de las señales se distinguen a corta o muy corta distancia
 - Las letras de las señales son ilegibles (ver figura 44)
- El túnel aparece completamente indefinido
- El alcance de la visión se encuentra entre los 2 y 4 metros.



Figura 44



Figura 45

De pie y túnel sin luces (ver CD Carpeta img-07 – Carpeta tn-4 – fwd)

- El nivel de detalle de la visión es nulo.
- Todos los colores han desaparecido, excepto los de las señales, donde la saturación del tono verde disminuye mucho con la distancia.
- Las señales son visibles:
 - Las figuras de las señales se distinguen a muy corta distancia
- Las letras de las señales son legibles a muy corta distancia (ver figura 47)
- El túnel aparece completamente indefinido
- El alcance de la visión se encuentra entre los 2 y 4 metros.



Figura 46

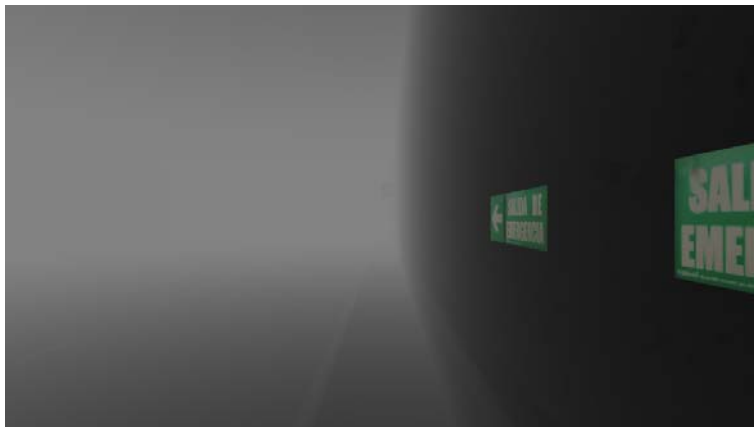


Figura 47

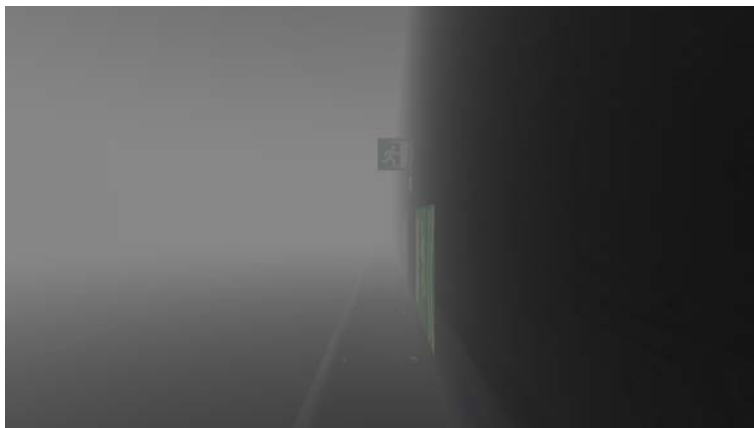


Figura 48

6.3.6 Con humo (0,3) sin luces

Conductor, y túnel sin luces (ver CD Carpeta img-14 – Carpeta tn-4 – fwd)

- El nivel de detalle de la visión es nulo.
- Todos los colores han desaparecido, excepto los de las señales, donde la saturación del tono verde es muy baja (tiende hacia el gris).
- Las señales han perdido casi por completo la visibilidad, dependiendo mucho del tamaño:
 - Las figuras de las señales se distinguen a corta o muy corta distancia
- Las letras de las señales son ilegibles (ver figura 49)
- El túnel aparece completamente indefinido
- El alcance de la visión se pierde alrededor de los 2 metros.



Figura 49



Figura 50

De pie y túnel sin luces (ver CD Carpeta img-15 – Carpeta tn-4 – fwd)

- El nivel de detalle de la visión es nulo.
- Todos los colores han desaparecido, excepto los de las señales, donde la saturación del tono verde es muy baja (tiende hacia el gris), a menos que la distancia a la señal sea MUY corta.
- Las señales han perdido casi por completo la visibilidad, dependiendo mucho del tamaño y la distancia:
 - Las figuras de las señales se distinguen a MUY corta distancia
 - Las letras de las señales son legibles a MUY corta distancia (ver figura 52)
- El túnel aparece completamente indefinido
- El alcance de la visión se pierde alrededor de los 2 metros.



Figura 51

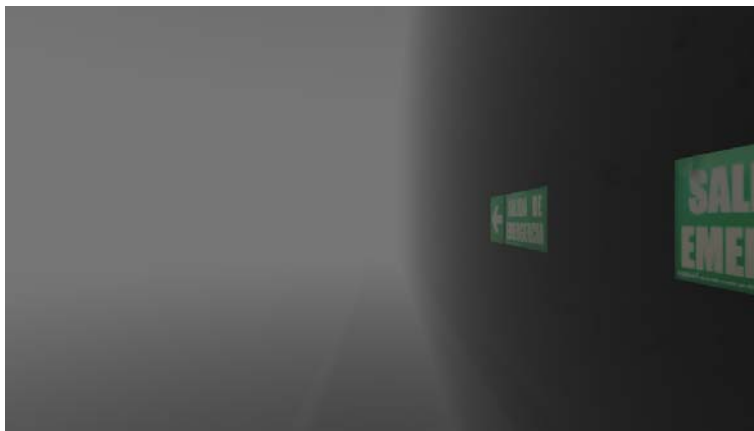


Figura 52

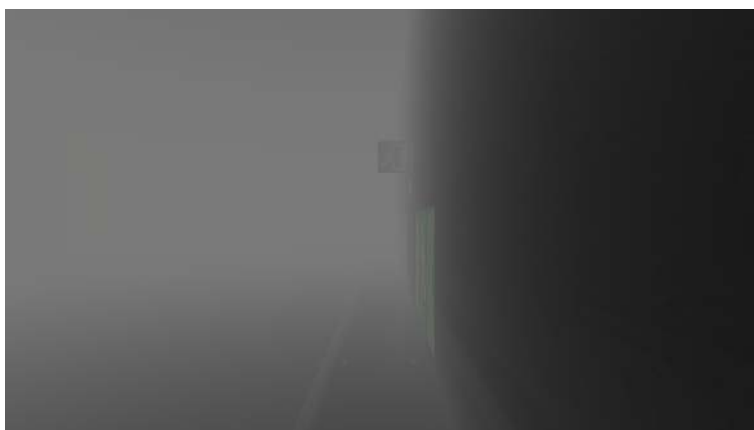


Figura 53

6.3.7 Con humo (0,4) sin luces

Conductor, y túnel sin luces (ver CD Carpeta img-10 – Carpeta tn-4 – fwd) –Nivel de detalle de la visión es nulo.

- Todos los colores han desaparecido.
- Las señales han perdido casi por completo la visibilidad, dependiendo mucho del tamaño y la distancia:
 - Las figuras de las señales se distinguen a MUY corta distancia
 - Las letras de las señales son legibles a MUY corta distancia
- El túnel aparece completamente indefinido
- El alcance de la visión se pierde a menos de 2 metros.



Figura 54



Figura 55

De pie y túnel sin luces (ver CD Carpeta img-11 – Carpeta tn-4 – fwd)

- El nivel de detalle de la visión es nulo.
- Todos los colores han desaparecido.
- Las señales han perdido casi por completo la visibilidad, dependiendo mucho del tamaño y la distancia:
 - Las figuras de las señales se distinguen a MUY corta distancia
 - Las letras de las señales son legibles a MUY corta distancia
- El túnel aparece completamente indefinido
- El alcance de la visión se pierde a menos de 2 metros.



Figura 56

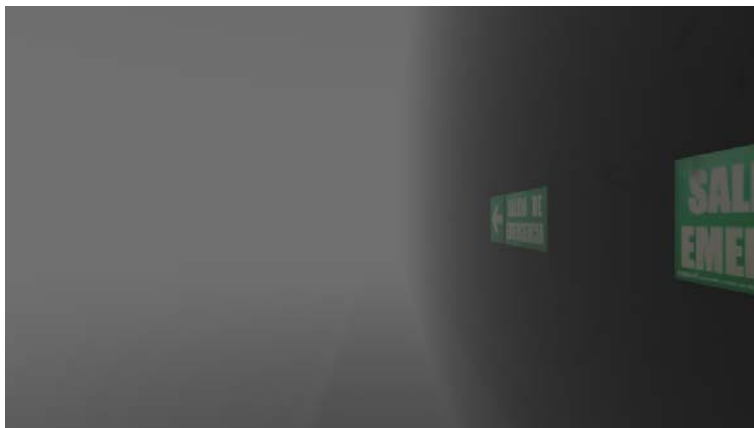


Figura 57

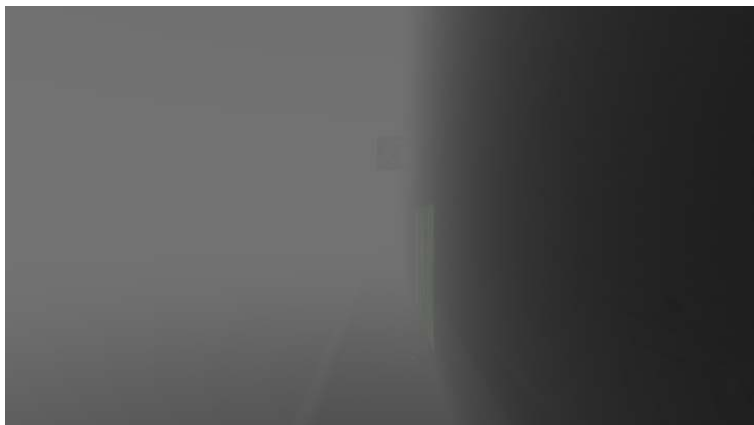


Figura 58

6.3.8 Con reproductor de tono estético

Con objeto de poner de manifiesto el comportamiento de un reproductor de tono estético, se han seleccionado dos casos de los analizados previamente para poder comparar. Se corresponde con conductor y túnel con luz y sin luz.

En ambos casos, a partir de la imagen HDR se le ha aplicado un reproductor de tono de tipo “estético”, que tiene parámetros para dejar la imagen bonita (Reinhart, 2002). El fallo de estos RT es que no puedes creerte que sea verdad lo que presentan, como demuestran estos casos.

La forma de la demostración va a consistir en mostrar un absurdo del siguiente modo:

Caso 1.

1. Se selecciona una imagen con el reproductor de tono Ferwerda (conductor, y túnel con luz)
2. Se selecciona el reproductor de tono estético (Reinhart) y se ajustan los parámetros de manera que quede la imagen parecida a la del paso 1.
3. Se selecciona otra imagen con el reproductor de tono Ferwerda (conductor, y túnel sin luz)
4. Se aplican los mismos valores de los parámetros del paso 2 a la imagen del paso 3.
5. Se comparan los resultados obtenidos en los pasos 3 y 4.
6. Se concluye que si el reproductor de tono estético fuese fenomenológico las imágenes se deberían parecer.
7. Conclusión, no se parecen.

Caso 2.

1. Se selecciona una imagen con el reproductor de tono Ferwerda (conductor, y túnel sin luz)
2. Se selecciona el reproductor de tono estético (Reinhart) y se ajustan los parámetros de manera que quede la imagen parecida a la del paso 1.
3. Se selecciona otra imagen con el reproductor de tono Ferwerda (conductor, y túnel con luz)
4. Se aplican los mismos valores de los parámetros del paso 2 a la imagen del paso 3.
5. Se comparan los resultados obtenidos en los pasos 3 y 4.
6. Se concluye que si el reproductor de tono estético fuese fenomenológico las imágenes se deberían parecer.
7. Conclusión, no se parecen.

Caso 1. Con luz

Para el caso con luz, se le aplica el Reprodutor de Tono con un par de parámetros ajustados para que quede bien ($\text{key}=0.18$, $\text{phi}=0.0$), aunque no se sabe lo que son, se intuye que representan simplemente una especie de ajuste de brillo.

Se obtiene la figura 60 denominada (Estético 1), el resultado es bonito. Ahora, si se le aplican los mismos parámetros a la imagen sin luz se obtiene la figura 62 denominada (Estético 3), que se ve brillante, aunque eso sabemos que no es cierto porque se está a oscuras prácticamente. ¡Un absurdo!



Figura 59. Ferwerda



Figura 60. Estético 1



Figura 61. Ferwerda



Figura 62. Estético 3

Caso 2. Sin luz

En este caso las figuras obtenidas se denominan (Estético 2 y 4) la idea es la misma pero a la inversa. Se ajusta la imagen sin luz para que se vea realmente que estamos en un túnel con poca luz, y al aplicarle los mismos parámetros a la imagen con-luz, sale igual de oscura, lo que es absurdo.

En resumen, tocando parámetros se puedes hacer que cualquier imagen, con mucha o poca luz, se vea de una forma o de otra, lo que no tiene nada que ver con cálculos reales.



Figura 63. Ferwerda



Figura 64. Estético 2



Figura 65. Ferwerda



Figura 66. Estético 4



7 Conclusiones y trabajo futuro

Recordemos que el objetivo de este Trabajo Fin de Grado es conseguir que un sistema de rendering basado en la física genere imágenes que sean lo más fieles posibles a lo que vería un ser humano, aplicándolo a señales de emergencia en túneles en el caso de un incendio y un apagón.

Se ha estudiado qué es un túnel, las situaciones críticas que pueden surgir, la señalética y normativa específica y el comportamiento de los usuarios.

Desde un punto de vista fisiológico se ha estudiado el sistema de visión de un usuario haciendo hincapié en aspectos de color.

Se ha realizado un análisis sobre los distintos elementos que intervienen en la simulación físicamente creíble de la iluminación.

De las necesidades requeridas por el problema y las especificaciones de los paquetes habituales de generación de 3D se concluye la necesidad de utilizar un sistema de simulación de la iluminación global basado en la física, que ha tenido que ser ampliado siguiendo las propuestas del autor de este TFG.

Posteriormente se ha investigado el problema de la generación de imágenes perceptualmente creíbles y se ha seleccionado e implementado el operador de reproducción de tono (Ferwerda et al). Dicho operador se ha aplicado al caso de un túnel en situaciones normales, con humo y apagón.

Se ha demostrado de una manera práctica que los reproductores de tono estéticos cumplen con su objetivo de obtención de imágenes visualmente atractivas pero no cumplen un comportamiento objetivo.

Se han implementado y demostrado que otros reproductores de tono (denominados 1-2 y 3) no cumplen con los requisitos de este TFG.

La metodología desarrollada permite aplicar la técnica de simular la percepción humana a otros entornos como trenes, metros, cabinas de avión, interior de vehículos, torres de control, aeropuertos, y escenarios en general, en situaciones normales y de emergencia.

Conclusiones desde el punto de vista del autor:

La tarea no ha sido nada fácil, aunque el resultado obtenido ha sido muy satisfactorio, ya que he:

- Utilizado conocimiento relacionado con las asignaturas de matemáticas, física, informática, metodología de desarrollo de proyectos, biónica, prospectiva...
- Accedido a literatura científica, artículos de revista y libros técnicos, un tipo de lectura al que no estaba muy acostumbrado a acceder.
- Especificado algoritmos, recordando lo que aprendí en la asignatura de informática, tarea que ha resultado dura.

- Deducido el algoritmo principal en base a un artículo principal, un libro y otros dos artículos secundarios. Sorprendentemente, no todo lo que se ha necesitado aparecía descrito en el artículo principal.
- Buscado valores y elementos en artículos y catálogos relacionados con diferentes temáticas, ya que he utilizado en todo momento valores reales.
- Aprendido que los resultados obtenidos a partir de una simulación son siempre aproximaciones a la realidad y que dependiendo de la calidad del modelo matemático subyacente los resultados son más o menos creíbles.
- Descubierta que hay diferencias en los resultados obtenibles dependiendo de si en la simulación se modela un ojo o una cámara.

Trabajo futuro

De los resultados de este trabajo fin de grado se deduce que el sentido de la vista en situaciones críticas (como en el caso de un túnel con humo y posibles apagones debido a incendios), teniendo en cuenta además el estado psicológico del usuario, disminuye su capacidad de proporcionar información al sistema cognitivo para tomar decisiones relacionadas con la supervivencia.

Por ello líneas de trabajo futuro podrían ser:

- Aumentar la capacidad de llamada de atención de las señales visuales, por ejemplo aumentando y variando su intensidad (ráfagas, destellos...).
- Introduciendo nuevas señales que actúen sobre los otros sentidos (tacto y oído)
- Buscar otros lugares de posicionamiento de luminarias y señales (por ejemplo en el suelo)
- ...

Comentarios finales:

C1. Obsérvese que todo lo analizado aquí está situado en el túnel y el usuario solo pone los ojos. Dado que las nuevas tecnologías de la información y la comunicación ofrecen medios como los smartphones, las tablets y en un futuro próximo los coches inteligentes, sería factible pensar en el uso de estos dispositivos para informar y proporcionar imágenes virtuales.

A modo de ejemplos:

Un coche inteligente que recibiera la señal de incendio e impidiese adentrarse en el túnel.

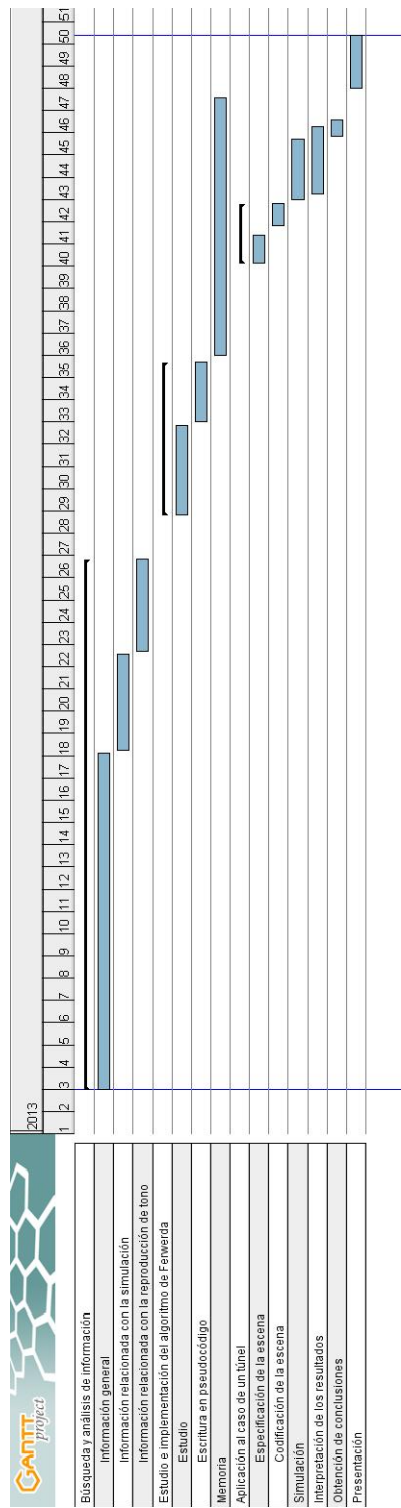
Un smartphone o tablet geo referenciada podría proporcionar la imagen limpia del interior del túnel aunque este estuviera lleno de humo.

C2. Como en todos los ámbitos basados en la ciencia y la tecnología existe un amplio conjunto de investigadores que trabajan en el desarrollo de mejores soluciones tanto del hardware como del software que con el tiempo conseguirán resultados mucho más precisos y eficientes, consiguiendo que las sensaciones producidas en el ser humano al mirar displays sean lo más fidedignas a la realidad posible.

8 Diagrama temporal

El trabajo fin de grado está estimado en el plan de estudios como 30 ECTS equivalentes a **750 horas**.

Este trabajo fin de grado está estimado en aproximadamente **900 horas**.





9 Bibliografía

[Bantele et al, 2011] Banterle, F., Artusi, A., Debattista, K.: "*Advanced High Dynamic Range Imaging*", A. K. Peters, Ltd., ISBN 978-1-56881-719-4, 2011.

[Duran et al, 2000] Durand, F., Dorsey, J.: *Interactive Tone Mapping*, Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering, 2000, pp. 219-230, 2000.

[Ferwerda et al, 1996] Ferwerda, J. A., Pattanaik, S. N., Shirley, P., Greenberg, D., P.: *A Model of Visual Adaptation for Realistic Image Synthesis*, Proceedings SIGGRAPH '96, 249-258, 1996.

[Fuentes – Cantillana, 2011] Fuentes-Cantillana ISUSI, J.L. "*Incendios en Túneles. Prevención y Control*". Manual de Túneles y Obras Subterráneas, cap. 48. Editor: Carlos López Jimeno. U.P.M. Mayo 2011. ISBN: 978-84-96140-36-3.

[Implaser, catálogo de productos]

http://www.implaser.com/senalizacion_de_seguridad_pdf/catalogo_implaser.html

[Indalux, catálogo de iluminación técnica]

http://pdf.archiexpo.es/pdf/indalux/catalogo-iluminacion-tecnica/49522-60811-_237.html

[Magallón, 2003] Magallón, J. A.: *Proyecto ALEPH. Simulación realista de la iluminación global mediante técnicas de Monte Carlo y procesamiento paralelo*. Tesis Doctoral de Ingeniería Industrial, Universidad de Zaragoza, 2003.

[Migoya, 2002] Migoya, E.: *Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: Aplicación a túneles de carretera*. Tesis Doctoral de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Madrid, 2002.

[Orta, 2002] Orta, C.: *Manual de Extinción de Incendios*. Capítulo "Incendios en túneles".

http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/tuneles.pdf, 2001.

[Pattanaik et al, 1998] Pattanaik, S. N., Ferwerda, J. A., Fairchild, M. D., Greenberg, D. P.: *A Multiscale Model of Adaptation and Spatial Vision for Realistic Image Display*, SIGGRAPH '98, pp 287-298, 1998.

[Reinhard et al] Reinhard, E., Stark, M., Shirley, P., Ferwerda, J.: *Photographic Tone Reproduction for Digital Images*, SIGGRAPH '02, pp 194 – 13, 2002.

Vilar et al 2013

Comentario

- En cada apéndice se puede encontrar la bibliografía referenciada.



10 Apéndices

1. Túneles y situaciones de emergencia en túneles
2. Señalética y normativa
3. La física de la visión
4. Ecuación de rendering basado en la física
5. ¿Qué software de rendering utilizar?
6. Otros experimentos que describen el comportamiento del ojo
7. Implementación del algoritmo
8. ficha_tecnica_implaled
9. Impacto visual del humo en túneles
10. Capítulo 13. Iluminación de túneles INDAL
11. Resultados obtenidos utilizando otros reproductores de tono

