



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLAS DE HIDALGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**INCORPORACIÓN DEL MODELO
MICROFACET PARA EL TRATAMIENTO
DE EFECTOS DE IRIDISCENCIA EN UN
MATERIAL POR CAPAS**

TESIS

presenta

Jehosafat Coria Barragán

Para obtener el grado de
**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA EN
ELÉCTRICA**



Dr. Luis Eduardo Gamboa Guzmán
Director de Tesis

Morelia, Michoacán, Septiembre 2025



**INCORPORACIÓN DEL MODELO DE MICROFACETAS PARA EL TRATAMIENTO
DE EFECTOS DE IRIDISCENCIA EN UN MATERIAL POR CAPAS**

Los Miembros del Jurado de Examen de Grado aprueban la Tesis de Maestría en
Ciencias en Ingeniería Eléctrica de Jehosafat Coria Barragán.

Dr. Alejandro Zamora Méndez
Presidente del Jurado

_____ 7 _____

Dr. Luis Eduardo Gamboa Guzmán
Director de Tesis

_____ Luis E. _____

Dr. Jaime Cerda Jacobo
Vocal

_____ J. _____
2

Dr. José Ortiz Béjar
Vocal

Dr. Luis Valero Elizondo
Revisor Externo

_____ Luis _____

Dr. J. Aurelio Medina Rios
*Jefe de la División de Estudios de Posgrado
de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. UMSNH
(Por reconocimiento de firmas)*

_____ J. _____
/

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Junio 2025

Abstract

The purpose of this project is to make an improvement to a previous model that simulates the visual phenomena of iridescence with the integration of a model based in microfacets. Firstly, the behaviour of the main project is implemented and analyzed. This has a diffuse material covered in a semi-transparent thin layer that calculates the phase change. Next, the capacity of the microfacets model based in physics is evaluated, while similar implementation models are being investigated, for example, the rough plastic model. This has the same parameterization as the base model, however, it uses the microfacet model. Both were combined, taking from the base model its treatment of light in three channels (RGB) and the phase change. While from the rough plastic model its calculation of reflected and transmitted energy is taken in the parameterization of the diffuse and microfacet surface. In this way, the equations and limitations of the new model are established. Then, the model is implemented to allow a comparison with the previous one. The result showed that the new model presents greater intensity and versatility in terms of iridescence, with a minimum difference in execution time.

Resumen

El propósito de este proyecto es realizar una modificación a un modelo previo que simula el fenómeno visual de iridiscencia, con la integración de un modelo basado en microfacetas. En primer lugar, se implementa y analiza el comportamiento del modelo base [Granier y Heidrich 2003]. Éste cuenta con un material difuso cubierto con una fina superficie semitransparente con la que se calcula el cambio de fase. A continuación se evalúa la capacidad del modelo de microfacetas [Walter et al. 2007] basado en física, mientras se investigan modelos de implementación similar, por ejemplo, el modelo de plástico áspero [Jakob 2010] tiene la misma parametrización que el modelo base, no obstante, utiliza el modelo de microfacetas. El modelo base y plástico áspero fueron combinados, tomando del modelo base su tratamiento de la luz en tres canales (RGB) y el cambio de fase. Mientras que del modelo de plástico áspero se toma su cálculo de energía reflejada y transmitida en la parametrización del material difuso y dieléctrico. De esta manera, se proponen las ecuaciones y se definen limitaciones del nuevo modelo para posteriormente implementarse y hacer la comparación con el modelo previo. El resultado reveló que el nuevo modelo presenta mayor intensidad y versatilidad en términos de iridiscencia, pero con una diferencia ligeramente mayor en tiempo de ejecución.

Palabras Clave: Renderizado basado en Física, Material por capas, Microfacetas, Iridiscencia, Plástico Áspero.

Contenido

Abstract	II
Resumen	III
Contenido	IV
Lista de Imágenes	VII
Lista de Tablas	IX
Lista de Símbolos y Acrónimos	X
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Antecedentes	6
1.3. Objetivos de la Tesis	9
1.3.1. Objetivo General	9
1.3.2. Objetivos Particulares	9
1.4. Metodología	10
1.5. Conclusión	10
1.6. Descripción de capítulos	11
2. Renderizado Basado en Física	12
2.1. Ecuación de Iluminación Directa	14
2.1.1. Estimador Monte Carlo	15

2.1.2. Ecuación de Iluminación Global	16
2.2. Función de Distribución de Dispersión Bidireccional	18
2.3. Modelo de Microfacetas	20
2.3.1. Energía reflejada	20
2.3.2. Energía transmitida	23
2.3.3. Modelo Completo	24
2.4. Modelo de Granier	26
2.4.1. Parte Dieléctrica	27
2.4.2. Parte Difusa	30
2.4.3. Modelo completo	31
2.5. Modelo de Plástico Áspero	31
2.5.1. Energía reflejada	32
2.5.2. Energía transmitida	32
2.5.3. Modelo final	37
2.6. Conclusiones	38
3. Modelo Propuesto	40
3.1. Implementación del modelo de Granier	40
3.1.1. Muestreo y probabilidad	41
3.1.2. Resultados	43
3.2. Modelo Propuesto	46
3.2.1. Parametrización	47
3.2.2. Evaluación del material	49
3.2.3. Muestreo y probabilidad	51
3.3. Conclusiones	55
4. Resultados	56
4.1. Resultados Obtenidos	57
4.2. Análisis de resultados	62
4.2.1. Tiempo de ejecución	65
4.2.2. Diferencias y Observaciones	67

<i>CONTENIDO</i>	VI
4.3. Conclusiones	68
5. Conclusiones	70
5.1. Trabajo a futuro	71
Bibliografía	73

Lista de Imágenes

1.1. Ilustración del espectro electromagnético	1
1.2. Ejemplos de iridiscencia	3
1.3. Fenómenos constructivos y destructivos en señales	4
1.4. Desfasamiento de la onda original en óptica de onda	5
1.5. Óptica des un punto de vista geométrico	5
1.6. Comparativa del modelo propuesto por Yan et al. [2018]	7
1.7. Comparativa del modelo base propuesto por Cook y Torrance [1982] y mo- delo modificado propuesto por Belcour y Barla [2017]	7
1.8. Ejemplos de otros modelos que presentan iridiscencia	8
1.9. Ejemplos del modelo iridiscente propuesto por Granier y Heidrich [2003] . .	9
2.1. Diagramas simplificados de medidas radiométricas	13
2.2. Escena simple con iluminación directa	14
2.3. Escena simple con iluminación global	17
2.4. Fenómenos físicos de la luz al impactar un objeto	18
2.5. Ejemplos de la interacción de la luz, con algunos tipos de superficies	19
2.6. Comparación entre la macrosuperficie y microsuperficie	20
2.7. Diferencia de aspereza del modelo Microfacet simple [Cook y Torrance 1982]	23
2.8. Diferencia de aspereza del modelo Microfacet mejorado [Walter et al. 2007]	25
2.9. Geometría local del modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003]	26
2.10. Camino de la luz transmitida por el material, en el modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003]	29

2.11. Diagramas representativos de las ecuaciones de transmisión en la superficie dieléctrica	34
2.12. Imágenes renderizadas del modelo de plástico áspero [Jakob et al. 2014] . .	38
3.1. Comparación del modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003] y el modelo plástico áspero [Jakob 2010]	45
3.2. Interacción interna entre la superficie dieléctrica y difusa de forma ideal . .	48
3.3. Interacción interna entre la superficie dieléctrica y difusa de forma real . .	49
3.4. Comparación del modelo base y modelo propuesto	53
3.5. Diagrama de flujo del modelo propuesto	54
4.1. Primer imagen renderizada de una escena con el modelo propuesto	58
4.2. Efecto de la iridiscencia obtenida, al variar los parámetros de distancia entre superficies y índice de refracción	59
4.3. Resultados al variar la longitud de onda en cada canal RGB	60
4.4. Impacto de variar la aspereza en el modelo propuesto	61
4.5. Comparativa entre el modelo base y el propuesto	64

Lista de Tablas

2.1. Parametros de entrada para obtener un valor, de la tabla de datos pre-computados.	35
3.1. Parámetros utilizados para las imágenes renderizadas con el modelo [Granier y Heidrich 2003]	44
4.1. Especificaciones de la computadora utilizada para realizar las imágenes renderizadas.	56
4.2. Parámetros utilizados en la primer imagen renderizada del modelo propuesto.	57
4.3. Parámetros para comparativa de modelos	62
4.4. Índices de aspereza	63
4.5. Comparación en tiempos de ejecución entre el modelo de Granier y Heidrich [2003] y el propuesto.	66

Lista de Símbolos y Acrónimos

Puntos, Vectores, Ángulos y Normales

$\vec{\omega}_i$	Vector de dirección entrante
$\vec{\omega}_o$	Vector de dirección saliente
$\vec{\omega}_{ri}$	Vector de dirección reflejada de $\vec{\omega}_i$
$\vec{\omega}_{ti}$	Vector de dirección transmitida de $\vec{\omega}_i$
$\vec{\omega}_{to}$	Vector de dirección transmitida de $\vec{\omega}_o$
$\vec{\omega}_{rti}$	Vector de dirección reflejada de $\vec{\omega}_{ti}$
$\vec{n}_0$	Normal de la superficie exterior
$\vec{n}_1$	Normal de la superficie interior
$\vec{\omega}_h$	Vector de dirección media entre $\vec{\omega}_i$ y $\vec{\omega}_o$
$\vec{\omega}_s$	Vector de dirección muestreada de forma especular
$\vec{\omega}_d$	Vector de dirección muestreada de forma difusa
x	Punto sobre la superficie del objeto
θ_i	Angulo entre la dirección incidente $\vec{\omega}_i$ y la normal $\vec{n}_0$
θ_o	Angulo entre la dirección saliente $\vec{\omega}_o$ y la normal $\vec{n}_0$

Probabilidad y Dominios

p	Probabilidad del muestreo
p_d	Probabilidad del muestreo difuso
p_s	Probabilidad del muestreo especular
H^2	Dominio de integración de todas las direcciones $\vec{\omega}_i$ en el hemisferio

Ω	Dominio de integración sobre todas las direcciones de luz posibles $\vec{\omega}_i$ en el hemisferio
----------	--

Iluminación y energía

L	Iluminación total
L_e	Radiancia emitida
Φ	Cambio de Fase
F	Reflectancia Fresnel
G	Enmascaramiento y sombreado
D	Función de distribución de normales
Φ	Cambio de fase
f_s	Función de distribución de la luz de forma especular
f_r	Función de distribución de la luz reflejada
f_t	Función de distribución de la luz transmitida
f_Φ	Función de distribución de la luz mutada
f_d	Función de distribución de la luz en la parte difusa
R	Energía reflejada
T	Energía transmitida
T_d	Energía transmitida de forma difusa
R_d	Energía reflejada de forma difusa
T_s	Energía transmitida de forma especular
R_s	Energía reflejada de forma especular
T_{12}	Energía transmitida de afuera del material hacia dentro desde la dirección $\vec{\omega}_i$
T_{21}	Energía transmitida de adentro del material hacia afuera desde la dirección $\vec{\omega}_o$

Parámetros constantes

η_i	Índice de refracción para el medio incidente
η_t	Índice de refracción para el medio transmitido

d	Distancia entre la superficie difusa y dieléctrica, expresada en nanómetros
λ	Longitud de onda asociada a cada canal RGB, expresada en nanómetros
e_0	Índice de brillo de la parte reflectiva en el modelo Granier
e_1	Índice de brillo de la parte transmitiva en el modelo Granier
α	Índice de aspereza o rugosidad del modelo Microfacet
ξ	Valor flotante aleatorio en el intervalo [0.0 - 1.0)
N	Número de muestras del integrador Monte Carlo
w_s	Peso de la parte dieléctrica
w_d	Peso de la parte difusa
f	Coefficiente Fresnel

Lista de Acrónimos

BRDF	Función de distribución bidireccional de reflexión
BTDF	Función de distribución bidireccional de transmisión
BSDF	Función de distribución bidireccional de dispersión
LTE	Ecuación de transporte de luz
PT	Trazado de caminos
NDF	Función de distribución de normales
RGB	Rojo, Verde y Azul
CPU	Unidad Central de Procesamiento
CC0	<i>Creative Commons</i> Cero

Unidades de Medida

m	Metros
nm	Nanometros
Hz	Hercios
W	Vatios
sr	Esterradianes
spp	Muestras por pixel

Capítulo 1

Introducción

El espectro electromagnético, es el conjunto de todas las ondas electromagnéticas de luz. Como es el caso de las ondas de radio, microondas, infrarrojo, rayos X, rayos gamma, entre otras. De ellas, sólo el espectro visible es perceptible para el ojo humano, ya que presenta frecuencias de longitud de onda comprendidas entre 380nm y 750nm. Gracias a ello es que somos capaces de distinguir colores, formas, figuras y texturas; entre otros fenómenos sensibles. En la Figura 1.1 se puede apreciar los ejemplos de algunos tipos de radiación, en que longitud de onda se encuentran, así como su frecuencia.

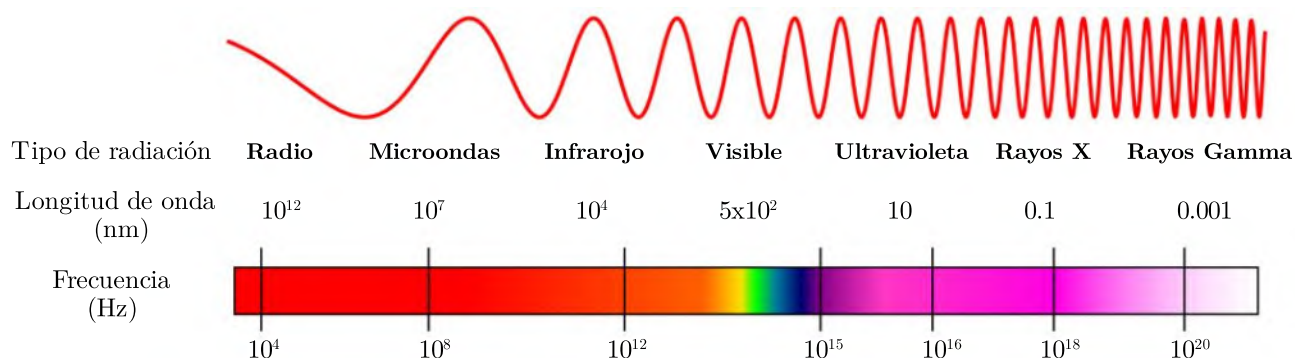


Figura 1.1: Ilustración del espectro electromagnético, destacando propiedades como el tamaño de la longitud de onda en nanómetros y frecuencia en hercios de las diferentes ondas electromagnéticas [Wikimedia Commons 2008].

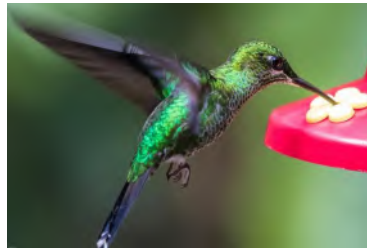
El efecto visual específico en el que se trabaja es la iridiscencia o goniocromismo. Es una propiedad óptica que presentan algunas superficies, lo que permite el cambio gradual de color a medida que se rota el ángulo de vista y/o de la luz.

Este fenómeno se presenta originalmente en la naturaleza. Se puede apreciar en la piel o alas de algunos insectos como escarabajos, moscas ó libélulas, en el plumaje de aves como el pavo real, colibrí o palomas, en las escamas de animales como pescados o serpientes y en minerales como los fósiles de amonita y las geodas.

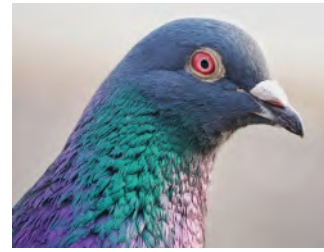
Este efecto tan maravilloso y complicado se ha logrado recrear por el ser humano mediante diferentes materiales, como en barnices para uñas, pintura para coches, burbujas de jabón, manchas de aceite o incluso en la contraparte de los CDs. Algunos de estos ejemplos se pueden apreciar en la Figura 1.2.



(a) Pavo real macho



(b) Colibri



(c) Paloma bravía



(d) Escarabajo pelotero



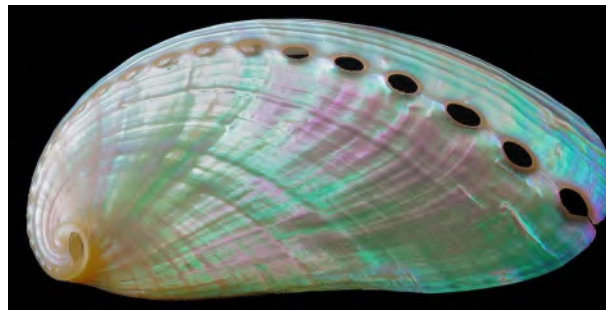
(e) Mosca común



(f) Libélula azul



(g) Boa arcoiris



(h) Concha abulón



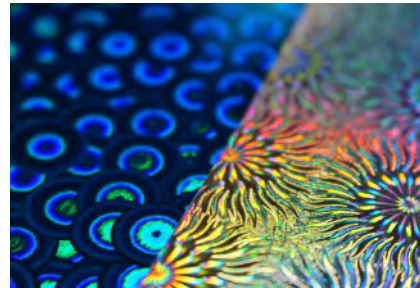
(i) Labradorita



(j) Burbujas de jabón



(k) Prendas de vestir



(l) Papel holográfico

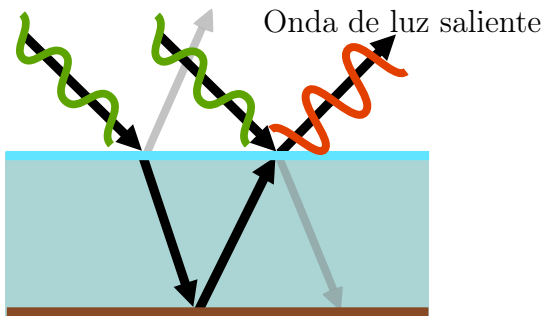
Figura 1.2: Ejemplos de iridiscencia presentes en la naturaleza y creados por el hombre [Pixabay 2025], [Pexels 2025].

1.1. Planteamiento del problema

La iridiscencia es un fenómeno que se experimenta visualmente en escasas ocasiones, debido a una condición específica obligada: contar con al menos una fina superficie semi-transparente. Este efecto surge de las reflexiones dentro de estas finas superficies semi-transparentes, amplificando o atenuando algunas frecuencias de luz más que otras.

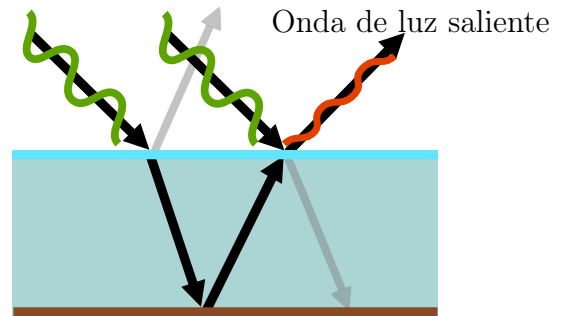
El caso más simple sucede cuando dos ondas de luz impactan en diferentes puntos, estas recorren la superficie delgada y salen por el mismo punto, lo que ocasiona que se superpongan. Existen dos formas de interacción entre señales: la constructiva y la destructiva. La primera se da cuando las ondas salientes van en la misma dirección y misma fase, los puntos críticos (mínimos y máximos) están alineados y crean una sola onda de mayor amplitud, como se puede apreciar en la Figura 1.3a. La segunda se refiere al caso contrario, que se da cuando las ondas están desfasadas, dado que el punto más alto de una onda empata con el punto más bajo de la otra y viceversa. Por lo tanto, estas pierden potencia y disminuyen su amplitud, como se puede apreciar en la Figura 1.3b.

Ondas de luz incidentes



(a) Construcción

Ondas de luz incidentes



(b) Destrucción

Figura 1.3: En óptica de onda se toma en cuenta a la luz como una señal, lo que permite obtener fenómenos constructivos y destructivos al impactar con una superficie.

Otro fenómeno que puede suceder es cuando la distancia entre superficies, es tan delgada que la longitud de la onda (1 ciclo) no puede pasar por completo, lo que ocasiona que se genere un cambio de fase adicional al salir del material, como se puede apreciar en la Figura 1.4.

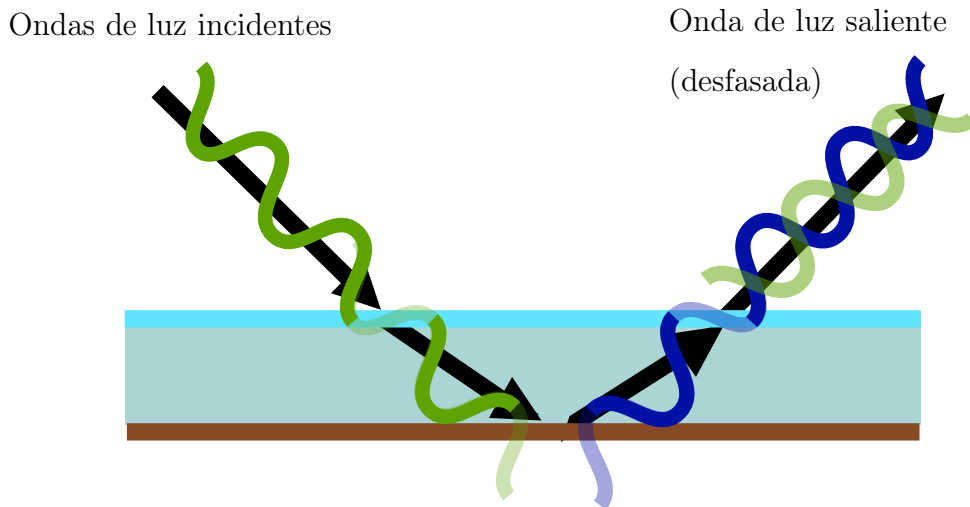


Figura 1.4: Cuando la señal original (verde) no logra pasar por completo, debido a la distancia tan pequeña entre ambas superficies, la onda resultante (azul) se desfasa con respecto a la original.

La suma de todos los cambios que le suceden a la onda original crean una interferencia, lo que da como resultado el cambio de color (iridiscencia).

En el área de renderizado por computadora es común tomar en cuenta la luz como una partícula en lugar de una señal, se modela a partir de rayos con un punto de origen y una dirección, donde únicamente se tiene una magnitud constante, lo que facilita su cálculo pero desprecia este tipo de fenómenos, como se puede observar en la Figura 1.5.

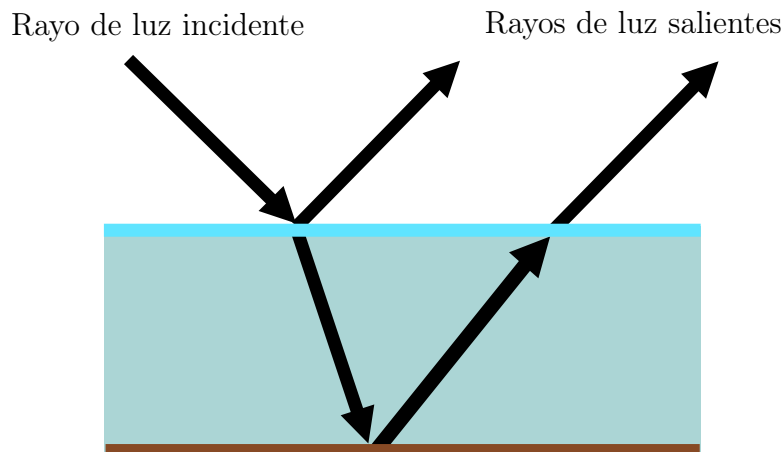


Figura 1.5: La óptica de rayos o geométrica únicamente toma en cuenta la dirección que recorre la luz de forma escalar, como si de una partícula se tratase.

La tendencia de la tecnología es crear representaciones gráficas cada vez más reales. Esto

se ha logrado mediante la renderización de objetos por computadora, con la creación de modelos capaces de mostrar cada detalle, por pequeño que sea, por lo que es necesario comprender la física de los materiales, así como la óptica de la luz, para replicar el fenómeno en la superficie de un objeto.

Actualmente existen modelos de renderizado capaces de recrear el efecto de la iridiscencia. El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo alternativo a los existentes que sea realista y versátil. Se busca crear un modelo capaz de representar este fenómeno físico, pero sin aumentar excesivamente el tiempo de ejecución. Para lograr resolver este problema, es indispensable utilizar trabajo previo en el área.

1.2. Antecedentes

Uno de los avances más relevantes para modelar fenómenos físicos fue el material multicapa propuesto por Jakob et al. [2014], donde su enfoque permite hacer el cálculo de la luz a través de múltiples superficies. Posteriormente Guo, Hašan y Zhao [2018], hicieron una mejora significativa a la eficiencia a este modelo, despreciando el desplazamiento horizontal de las direcciones, logrando reducir el tiempo de ejecución hasta 10 veces, dependiendo de la composición del material y el número de muestras. A pesar de que este método utiliza una configuración del material donde debería producirse la iridiscencia, no lo logra, porque aunque la distancia entre superficies sea delgada, la luz es tratada desde un punto de vista geométrico y si se desea obtener iridiscencia, la luz debe ser tratada desde un punto de vista de óptica de onda.

Otros modelos que intentan replicar el fenómeno físico, resuelven la problemática con diferentes metodologías; con cálculos internos donde la luz es tratada como onda [Yan et al. 2018], lo que les permite obtener buenos resultados sin aumentar excesivamente el tiempo de ejecución, un ejemplo de dicho modelo puede apreciarse en la Figura 1.6.



Figura 1.6: Comparativa del modelo propuesto por Yan et al. [2018]. Donde se pueden observar ambas metodologías de óptica, de lado izquierdo con óptica geométrica donde no existe la iridiscencia y de lado derecho con óptica de onda que si cuenta con iridiscencia.

Otro avance reciente de un material iridiscente es el propuesto por Belcour y Barla [2017], basado en el modelo de microfacetas [Cook y Torrance 1982]. Éste modifica el cálculo de la luz reflejada al reemplazar las ecuaciones originales, por otras que sí contemplan la interferencia de luz entre dos superficies, se puede apreciar una comparación con dicho modelo en la Figura 1.7.

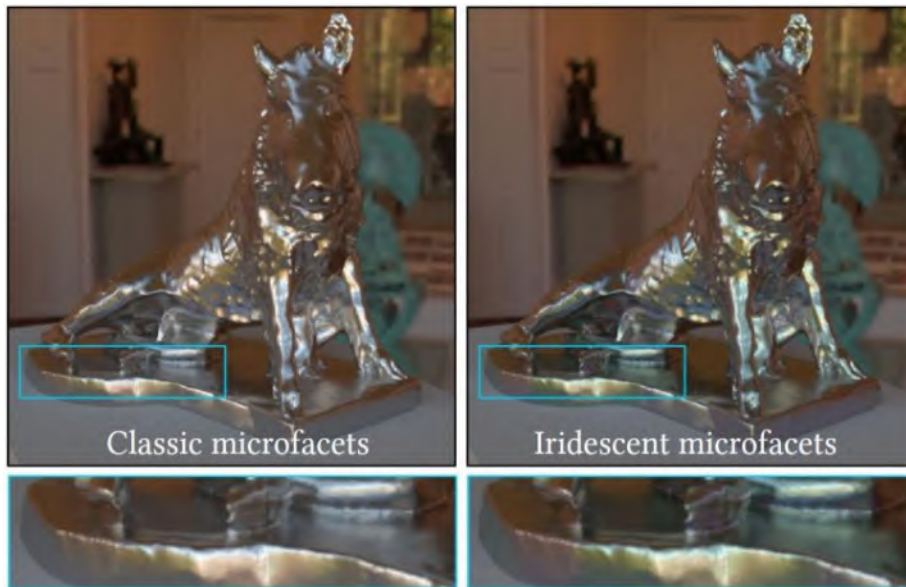


Figura 1.7: Comparativa entre ambos modelos, el modelo de microfacetas simple [Cook y Torrance 1982] ubicado de lado izquierdo y microfacetas modificado [Belcour y Barla 2017] que exhibe diferentes tonalidades (iridiscencia) de lado derecho.

También se han creado métodos para recrear la iridiscencia de maneras específicas. Como el caso del modelado de insectos [Sun 2006] y serpientes [Padron-Griffe et al. 2023], también existe una propuesta de modelado para CD [Sun et al. 2000], entre otros. Éstos hacen un análisis físico de sus componentes para posteriormente crear un modelo capaz de replicarlo, pero dado que resuelven la problemática para un objetivo en específico, no tienen mucha versatilidad. Algunos resultados de los modelos se pueden apreciar en la Figura 1.8.

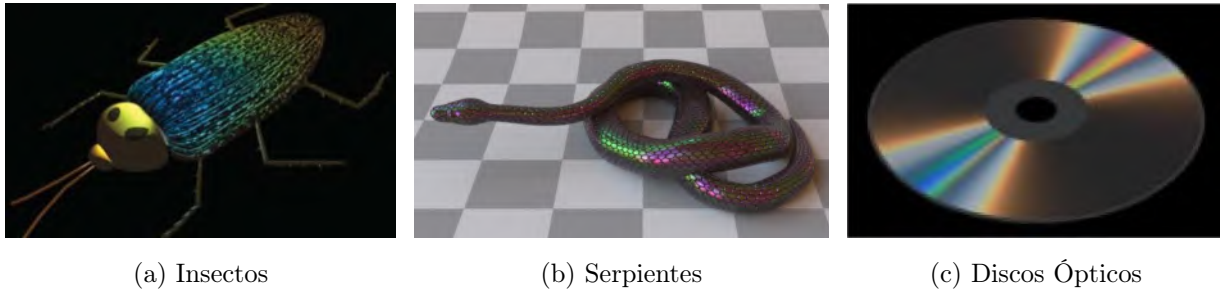


Figura 1.8: Algunos ejemplos de modelos que presentan iridiscencia para casos específicos: a) En la piel o alas de insectos [Sun 2006], b) En las pieles de algunas serpientes [Padron-Griffe et al. 2023] y c) Discos Ópticos o CD [Sun et al. 2000].

Si se desea obtener un método más flexible, se tiene que optar por un modelo más general, como el propuesto por Granier y Heidrich [2003], que modela la iridiscencia de un objeto opaco (difuso) con una fina superficie semitransparente (dieléctrica).

Su fórmula general utiliza óptica de onda en 3 canales RGB, así como un modelo de un material suave y brillante [Phong 1975] para realizar el cálculo de la energía reflejada y transmitida, también toma en cuenta el cambio de fase dependiendo de la distancia entre superficies [Born y Wolf 1999], todo esto en conjunto provoca iridiscencia, como se puede apreciar en la Figura 1.9.

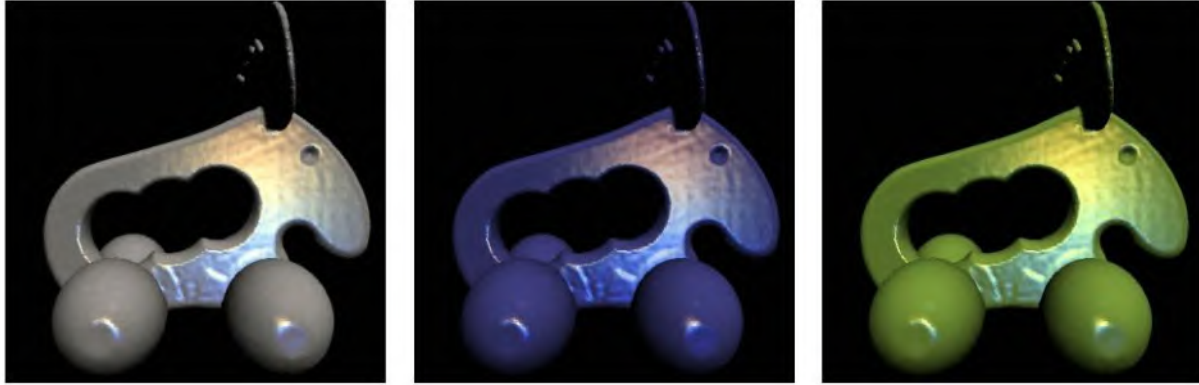


Figura 1.9: Imágenes renderizadas del modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003], donde a pesar de que el color del objeto cambia, debido a la distancia entre superficies, la fina superficie semitransparente produce iridiscencia.

Aunque el modelo es flexible y útil para aplicaciones prácticas, la superficie semitransparente carece de fundamentos físicos rigurosos. En cambio el modelo de microfacetas [Walter et al. 2007] ofrece una solución físicamente precisa para modelar materiales dieléctricos ásperos, siendo más adecuado para el propósito de esta tesis.

1.3. Objetivos de la Tesis

1.3.1. Objetivo General

Proponer un nuevo modelo de iridiscencia en base al propuesto por Granier y Heidrich [2003], con la integración de un modelo físicamente fundamentado, basado en microfacetas [Walter et al. 2007] en la superficie superior semitransparente, para obtener una representación más precisa del material.

1.3.2. Objetivos Particulares

- Implementar y analizar el comportamiento del modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003] en la representación de superficies iridiscentes.
- Evaluar la capacidad del modelo basado en microfacetas [Walter et al. 2007] e investigar modelos que lo implementan de forma similar.

- Definir las ecuaciones y limitaciones del modelo propuesto, para posteriormente realizar su implementación.
- Comparar el desempeño entre el modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003] y el nuevo modelo propuesto en el contexto de materiales iridiscentes.

1.4. Metodología

Se utilizará un motor de renderizado de código abierto escrito en C++ llamado Mitsuba [Jakob 2010], enfocado a la investigación donde se proveen métodos existentes y facilita la inclusión de nuevos modelos, la versión a utilizar es la 0.6.

Los pasos a seguir para completar este proyecto son los siguientes:

- Realizar la implementación del modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003] en Mitsuba, para obtener una base estable de la cual se pueda partir.
- Investigar qué método implementar para respetar la composición del material original [Granier y Heidrich 2003], pero utilizando el material dieléctrico basado en microfacetas [Walter et al. 2007], sin aumentar excesivamente el tiempo de ejecución.
- Proponer las fórmulas del nuevo modelo y definir sus limitantes.
- Realizar múltiples renderizados del modelo base así como el modelo propuesto para hacer una comparación de resultados y tiempo de ejecución, para medir su desempeño.

1.5. Conclusión

En este capítulo se introdujo la problemática a resolver, los objetivos a cumplir y la metodología a utilizar. Con los antecedentes se pudo observar una nueva oportunidad de

proponer un modelo más versátil y físicamente correcto capaz de simular objetos iridiscuentes. Con ayuda de este capítulo y el próximo se tendrán las bases necesarias para entender el nuevo modelo.

1.6. Descripción de capítulos

En el segundo capítulo se da conocimiento sobre el funcionamiento del renderizado basado en física, así como de los modelos Microfacet [Walter et al. 2007], Granier [Granier y Heidrich 2003] y Plástico Áspero [Jakob 2010], ya que fungen como base del modelo a proponer.

Posteriormente, en el tercer capítulo, se realiza la implementación del modelo de Granier [Granier y Heidrich 2003] en el motor gráfico Mitsuba [Jakob 2010], consiguiendo el punto de partida. A partir de éste, se diseñan las ecuaciones y implementa el nuevo modelo propuesto.

En el capítulo número cuatro se prueba el modelo. Se realizan diversas variaciones en los parámetros para observar su comportamiento. El resultado se compara con el modelo base [Granier y Heidrich 2003], y se exponen las diferencias.

Por último, en el apartado de las conclusiones, se aterrizan los resultados, y se proponen posibles trabajos a futuro, a partir de este nuevo modelo.

Capítulo 2

Renderizado Basado en Física

Para renderizar imágenes se utilizan todos los recursos disponibles en la computadora. Aunque antes había ciertas limitaciones, como la baja capacidad de procesamiento de los CPU (Unidad Central de Procesamiento), la evolución de las computadoras ocasionó que se crearan métodos cada vez mejores. El tiempo de ejecución de renderizar, varía dependiendo del entorno y número de muestras, pero el objetivo es obtener los mejores resultados en el menor tiempo posible.

Al inicio era común crear modelos capaces de aparentar el comportamiento físico de los objetos y el entorno. Esto era conveniente para evitar tiempos de ejecución elevados. No obstante, con el objetivo de aumentar el realismo cada vez se volvían más complejos y tardados. Por tanto, optar por modelar de manera físicamente correcta el comportamiento de estos se convirtió en una mejor opción, dado que los CPU ya permitían reducir el tiempo de ejecución. Así fue evolucionando el renderizado por computadoras, donde en lugar de tomar atajos se aplicaba la física, dándole mayor realismo.

Para renderizar una imagen es necesario primero definir una escena. Esta escena consiste de un entorno compuesto por los siguientes elementos:

- **Objetos tridimensionales:** Definidos por su geometría, ya sea mediante mallas, primitivas o superficies y por materiales que definen su interacción con la luz.
- **Fuentes de luz:** Elementos que emiten energía luminosa en la escena como luces puntuales, luces de área o iluminación ambiental.

- **Cámara o sensor:** Hace un mapeo para calcular el color del pixel en cada posición para obtener la imagen resultante.

La interacción entre la luz y los objetos se calcula mediante el lanzamiento de rayos, una línea semi-infinita determinada por un punto origen x y un vector de dirección normalizado $\vec{\omega}$.

Dentro de la óptica y el renderizado de imágenes, la luz generalmente tiene tres formas de medirse:

- **a) Radiancia:** Es la cantidad de luz emitida desde un punto, en una dirección específica. Se mide en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, donde **sr** (estereorradián) es la unidad de ángulo sólido que representa una dirección en el espacio tridimensional.
- **b) Irradiancia:** Es la luz incidente en un punto desde todas las direcciones en la superficie. Se mide en W/m^2
- **c) Flujo Radiante:** Cantidad de luz emitida o recibida en una superficie desde todas las direcciones por unidad de tiempo. Se mide en W (vatios).

En la Figura 2.1 se pueden observar diagramas simplificados de estas tres mediciones.

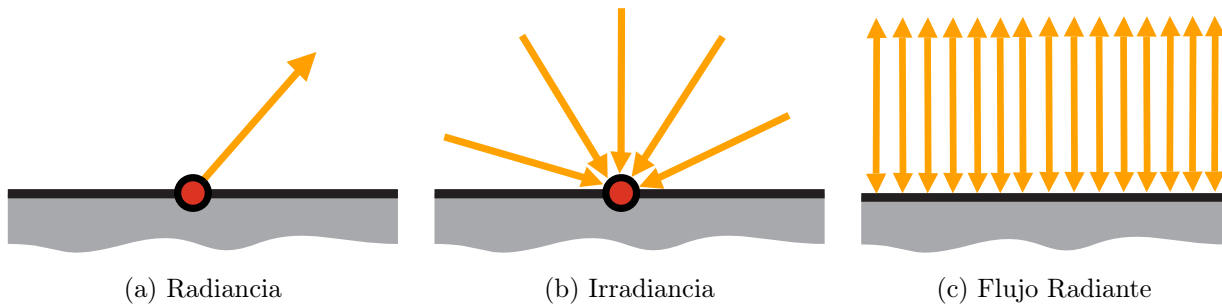


Figura 2.1: Diagramas simplificados de medidas radiométricas, la radiancia indica cuánta luz emite o refleja un objeto desde una dirección, la irradiancia es la luz total recibida desde múltiples direcciones, mientras que el flujo radiante sirve para saber cuánta energía total recibió, reflejó o absorbió una superficie.

2.1. Ecuación de Iluminación Directa

Existen diversos métodos para calcular el color de la luz reflejada, en el punto de intersección con un objeto de la escena. El que se explica a continuación es la ecuación de iluminación directa propuesta inicialmente por Kajiya [1986].

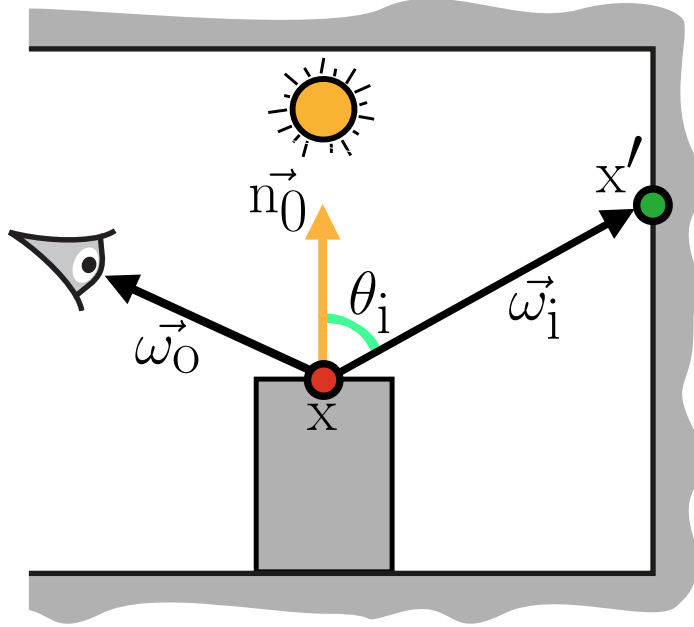


Figura 2.2: Escena simple con iluminación directa, vista desde un punto de vista en dos dimensiones para simplificar la interpretación.

Un caso sencillo de una escena se muestra en la Figura 2.2 donde el sensor observa un punto x en la escena con una dirección $\vec{\omega}_o$, en dicho punto la normal es $\vec{n}_0$. La luz emitida hacia el punto tendrá una dirección $\vec{\omega}_i$ desde algún otro punto x' donde existe un ángulo θ_i entre la normal y la dirección $\vec{\omega}_i$.

Dado que el punto x' no emite luz, es necesario trazar más rayos para ver si es posible que alguno de ellos logre intersectar la luz. El resultado final es la suma de la luz reflejada desde todas las direcciones alrededor del mismo punto (irradiancia).

La fórmula de la ecuación de iluminación directa [Kajiya 1986] está definida en la Ecuación 2.1.

$$L(x, \vec{\omega}_o) = \int_{\Omega} L_e(x', -\vec{\omega}_i) f_s(\vec{x}, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) \cos \theta_i d\vec{\omega}_i \quad (2.1)$$

La Ecuación 2.1 denota que la radiancia saliente L en x con dirección $\vec{\omega}_o$, es la suma de luz para todas las direcciones incidentes $\vec{\omega}_i$ en el dominio Ω . La función L_e denota la radiancia emitida desde x' hacia el punto observado. La función f_s define como la luz cambia después de interactuar con un objeto y depende del modelo del material.

El simple hecho de resolver esta integral para cada punto de la escena ya vuelve a este proceso complejo. Esto sin tomar en cuenta que dicha integral no es suave, sino discontinua, por lo que se debe resolver de forma numérica.

2.1.1. Estimador Monte Carlo

La solución más popular para resolver la ecuación de iluminación directa es el estimador Monte Carlo [Shirley, Wang y Zimmerman 1996]. Gracias a su flexibilidad es capaz de resolver integrales complejas de múltiples dimensiones. Este estimador funciona utilizando muestras de direcciones aleatorias $\vec{\omega}_i$ dentro del dominio de integración. A esto se le conoce como distribución y cada muestra tiene una probabilidad en dicha distribución $p(\vec{\omega}_i[j])$. Cada una de las muestras contribuye al resultado final, logrando una aproximación a la integral original, donde su precisión puede mejorar al aumentar la cantidad de muestras, pero es importante mencionar, que entre más muestras se utilicen más elevado será el tiempo de ejecución.

El estimador Monte Carlo para la ecuación de iluminación directa L está definido en la Ecuación 2.2.

$$L(x, \vec{\omega}_o) \approx \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{L_e(x', -\vec{\omega}_i[j]) f_s(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i[j]) \cos \theta_i}{p(\vec{\omega}_i[j])} \quad (2.2)$$

Donde N es el número de muestras y la función debe dividirse por la probabilidad p del muestreo de la dirección $\vec{\omega}_i$, su objetivo es determinar cuanto contribuye cada muestra al resultado final. Una muestra poco probable tendrá una probabilidad cercana a 0, mientras que una dirección muy probable de ocurrir tendrá una probabilidad cercana a 1. Por lo que la distribución de las muestras y su probabilidad influye en la eficiencia del estimador; un muestreo eficiente permite minimizar el error sin hacer un gasto computacional innecesario, más adelante se verá el cálculo de algunas distribuciones de direcciones con sus respectivas

probabilidades.

2.1.2. Ecuación de Iluminación Global

La iluminación directa únicamente toma en cuenta la primera intersección de la luz, pero esto no es físicamente correcto, debido a que la luz continua rebotando infinitamente hasta agotar su energía, para tomar en cuenta todo este camino de luz es necesario no detenerse en el primer objeto impactado. Se debe seguir con un nuevo rayo que dependerá de las propiedades del material del objeto impactado. El fenómeno de rebote es muy útil para que la luz sea modelada de forma realista en una escena, donde se toma en cuenta la luz que ilumina de forma directa, y la luz que es recibida de forma indirecta por los objetos cercanos.

La ecuación de iluminación global o también llamada ecuación de transporte de luz LTE por sus siglas en ingles: *Light Transport Equation* (LTE), propuesta por Kajiya [1986] está definida en la Ecuación 2.3.

$$L(\mathbf{x}, \vec{\omega}_o) = L_e(\mathbf{x}, \vec{\omega}_o) + \int_{S^2} L(\mathbf{x}', -\vec{\omega}_i) f_s(\mathbf{x}, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o) |\cos \theta_i| d\vec{\omega}_i \quad (2.3)$$

En simple instancia, se puede ver la suma de dos términos. El primero es la luz emitida L_e en $\mathbf{x}$ y el segundo término representa la radiancia reflejada en $\mathbf{x}$ desde todas las posibles direcciones $\vec{\omega}_i$. En el caso del segundo término, se trata de una integral donde ahora se calcula L pero para el punto $\mathbf{x}'$ en el dominio S^2 , de modo que se tiene algo similar a una recursión. Donde se toma en cuenta la luz emitida en un punto de la escena, a partir de otro punto de la misma. Posteriormente, se aplicará la integral para ese otro punto a partir de un punto adicional diferente, y así sucesivamente hasta que alguno de los puntos provenga de una fuente luminosa o se cumplan una cantidad máxima de rebotes. Ahora se tiene el mismo problema que al principio como se muestra en la Figura 2.3, con la diferencia de que en este caso, se enfocara en otro punto de la escena, lo que implica volver a resolver la integral.

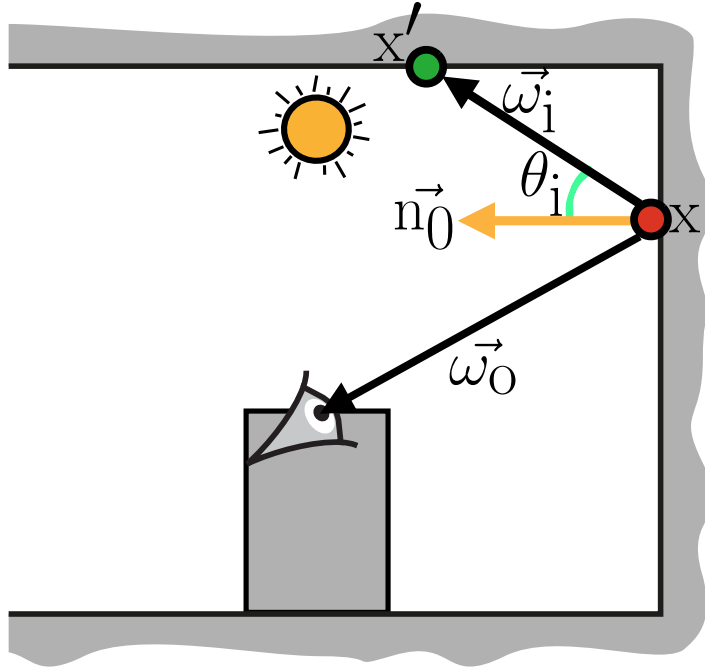


Figura 2.3: Escena simplificada con iluminación global vista desde una perspectiva en dos dimensiones, ahora el punto x' es el nuevo punto x , a partir de este se lanza otro rayo, en esta ocasión el nuevo rayo tampoco impacta la luz, por lo que se debe continuar su recorrido hasta que logre impactar una fuente de luz.

Existen diversos métodos numéricos para resolver la integral de la Ecuación 2.3. En esta investigación se utilizará el método trazado de caminos o *Path Tracing* (PT), una técnica basada en el método Monte Carlo [Shirley, Wang y Zimmerman 1996], debido a su capacidad de aproximar de forma consistente y físicamente realista efectos complejos como la luz. El método está definido en la Ecuación 2.4.

$$L(x, \vec{\omega}_o) \approx L_e(x, \vec{\omega}_o) + \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{L(x', -\vec{\omega}_i[j]) f_s(x, \vec{\omega}_i[j], \vec{\omega}_o) |\cos \theta_i|}{p(\vec{\omega}_i[j])} \quad (2.4)$$

La luz directa puede considerar múltiples fuentes, pero solo la interacción con el primer objeto impactado cuenta. En iluminación global, no únicamente se considera la iluminación directa, sino también las interacciones indirectas de los objetos cercanos, dándole mayor realismo. En esta investigación se abordarán ambas metodologías.

2.2. Función de Distribución de Dispersión Bidireccional

La función de distribución bidireccional de dispersión o *Bidirectional Scattering Distribution Function* (BSDF), comúnmente denotado como f_s en ecuaciones, modela como interactúa la luz al impactar con una superficie, el resultado depende de las propiedades del material impactado, los dos fenómenos más importantes para este proyecto son los siguientes:

- a) **Reflexión:** Ocurre cuando la luz rebota en la superficie y sale en una dirección sobre el mismo hemisferio, como se puede apreciar en la Figura 2.4a.
- b) **Transmisión:** Ocurre cuando la luz logra atravesar la superficie del material e interacciona dentro del objeto, como se puede observar en la Figura 2.4b.

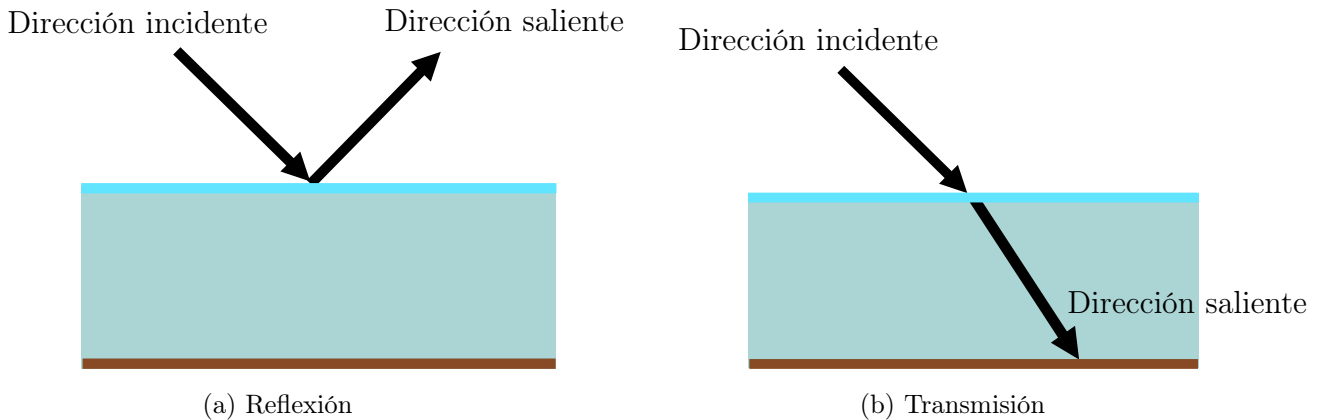


Figura 2.4: Fenómenos físicos de la luz al impactar un objeto, los cuales dependen de las propiedades del material, en el caso de la reflexión y transmisión se tiene una dirección saliente diferente a la incidente.

Cuando la luz impacta a un objeto, el comportamiento del material del objeto se modela mediante dos funciones. Para el caso de la reflexión, es mediante la función de distribución bidireccional de reflexión (BRDF) denotada como f_r , mientras que para la transmisión es la función de distribución bidireccional de transmisión (BTDF) denotada como f_t . Si el material cuenta con ambos fenómenos, se deben sumar ambas funciones dando como resultado la función de distribución bidireccional de dispersión (BSDF) denotada como f_s :

$$f_s = f_r + f_t \quad (2.5)$$

El resultado de esta función depende de las propiedades del material. Por ejemplo, una superficie difusa (como el gis o yeso) no cuenta con transmisión y presenta reflexión de manera uniforme en todas las direcciones, como se puede apreciar en la Figura 2.5a. En cambio, las superficies especulares (como los espejos), presentan reflexión perfecta y tampoco cuentan con transmisión, ilustrada en la Figura 2.5b. Por otro lado, los materiales semitransparentes, también llamados dieléctricos (como el vidrio o algunos plásticos), presentan tanto reflexión como transmisión en su superficie, como se puede observar en la Figura 2.5c.

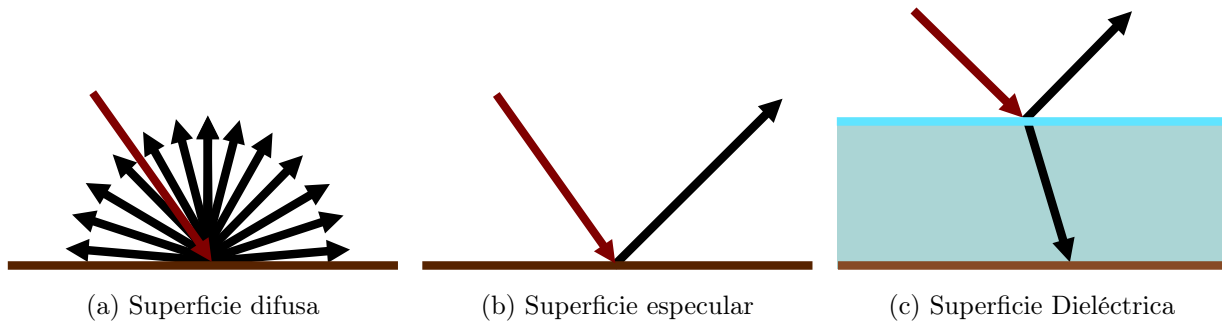


Figura 2.5: Ejemplos de la interacción de la luz, con algunos tipos de superficies, que dependiendo de sus propiedades pueden exhibir reflexión y transmisión.

Esta investigación se enfocará en la BSDF, el material propuesto es compuesto, una superficie difusa que únicamente refleja, cubierta por una fina superficie dieléctrica que exhibe tanto reflexión como transmisión. La interacción de la luz interna entre estas dos superficies genera un fenómeno llamado iridiscencia.

Para llevar esto a cabo, primero se analizará la superficie dieléctrica, con el modelo de microfacetas [Walter et al. 2007], que modela tanto la reflexión como la transmisión de la luz en una superficie dieléctrica, con pequeñas perturbaciones que permiten variar la aspereza, dándole un aspecto físicamente realista.

2.3. Modelo de Microfacetas

El modelo de microfacetas introducido por Cook y Torrance [1982], propone una superficie rugosa compuesta por pequeñas perturbaciones llamadas microfacetas. Éstas son extremadamente pequeñas, pero no fue hasta la modificación propuesta por Walter et al. [2007] que se logró que exhibieran ambos fenómenos; reflexión y transmisión, convirtiéndola en una superficie dieléctrica capaz de representar distintos tipos de aspereza. El conjunto de las microfacetas se conoce como microsuperficie. En cambio, la interfaz plana del objeto se conoce como macrosuperficie. En la Figura 2.6 se puede apreciar ambas interfaces.

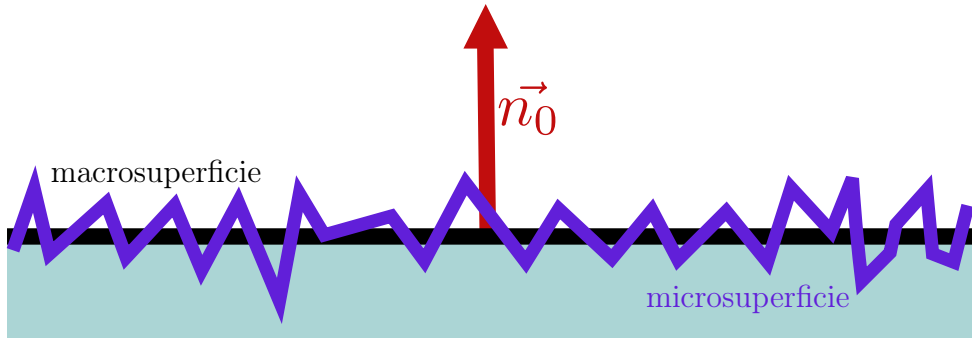


Figura 2.6: Comparación entre ambas superficies, la línea color negro es la representación generalizada de las microfacetas (macrosuperficie), en cambio, la línea morada es una superficie detallada con las microfacetas individuales (microsuperficie).

La orientación de las microfacetas está dada por una distribución de normales D , que define la probabilidad de que las microfacetas estén alineadas con una dirección $\vec{\omega}$ dada. Esta distribución depende de un único parámetro α , que representa la rugosidad de la superficie, valores pequeños de α (cerca de 0) representan superficies suaves y altamente reflectantes, mientras que valores altos (cerca de 1) corresponden a superficies más rugosas y con reflexión difusa. De esta manera este modelo es capaz de representar diferentes tipos de superficies dieléctricas, lo que lo convierte en un modelo flexible y físicamente correcto.

2.3.1. Energía reflejada

Este modelo cuenta con dos cálculos importantes para su BSDF, la energía que se reflejó después de impactar con el material y la energía que se transmitió a través de la superficie. La fórmula para la reflexión f_r está definida en la Ecuación 2.6.

$$f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) = \frac{F(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_h) G(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_h, \vec{n}_0) D(\vec{\omega}_h, \vec{n}_0)}{4|\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}_0||\vec{\omega}_o \cdot \vec{n}_0|} \quad (2.6)$$

Donde $\vec{\omega}_h$ es el vector de dirección media entre $\vec{\omega}_i$ y $\vec{\omega}_o$, su cálculo para la reflexión está definida en la Ecuación 2.7.

$$\vec{\omega}_h = \frac{\vec{\omega}_i + \vec{\omega}_o}{||\vec{\omega}_i + \vec{\omega}_o||} \quad (2.7)$$

Para calcular la ecuación del modelo se toman en cuenta tres factores diferentes:

Fresnel (F): Se refiere a la cantidad de luz que logró reflejarse, su cálculo está definido en la Ecuación 2.8.

$$F(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_h) = \frac{1}{2} \frac{(g - c)^2}{(g + c)^2} \left(1 + \frac{(c(g + c) - 1)^2}{(c(g - c) - 1)^2} \right) \quad (2.8)$$

Donde g y c son variables auxiliares y están definidas en la Ecuación 2.9.

$$g = \sqrt{\frac{\eta_t^2}{\eta_i^2} - 1 + c^2}, \quad c = |\vec{\omega}_i \cdot \vec{\omega}_h| \quad (2.9)$$

Donde n_i representa el índice de refracción del medio incidente (fuera del material) y n_t es el índice de refracción del medio transmitido (dentro del material). No confundir con las normales en la superficies $\vec{n}_0$ y $\vec{n}_1$.

Función de distribución de normales (D): Indica la cantidad de normales de las microfacetas que están alineadas en una dirección específica. Para el caso de la distribución Beckmann [Beckmann y Spizzichino 1963], está definida en la Ecuación 2.10.

$$D(\vec{\omega}_h, \vec{n}_0) = \frac{\chi^+(\vec{\omega}_h \cdot \vec{n}_0)}{\pi \alpha^2 \cos^4 \theta_h} e^{\frac{-\tan^2 \theta_h}{\alpha^2}} \quad (2.10)$$

Donde θ_h es el ángulo entre el vector de dirección media y la normal, α es una constante que define la aspereza del material, donde entre más alto más difuso será ($\alpha \rightarrow 1$) y entre más bajo más especular se volverá ($\alpha \rightarrow 0$). χ^+ es una función positiva característica definida en la Ecuación 2.11.

$$\chi^+(b) \begin{cases} 1 & \text{si } b > 0 \\ 0 & \text{si } b \leq 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Donde b es el parámetro a evaluar, en el caso de D es $(\vec{\omega}_h \cdot \vec{n}_0)$.

Enmascaramiento y sombreado (G): Es la porción de las microfacetas que son visibles en ambas direcciones $(\vec{\omega}_i$ y $\vec{\omega}_o$) y su cálculo está definido en la Ecuación 2.12.

$$G(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_h, \vec{n}_0) \approx G_1(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_h, \vec{n}_0) G_1(\vec{\omega}_o, \vec{\omega}_h, \vec{n}_0) \quad (2.12)$$

Donde G_1 depende de la distribución de microfacetas, para la distribución de Beckmann G_1 está definido en la Ecuación 2.13.

$$G_1(\vec{\omega}_v, \vec{\omega}_h, \vec{n}_0) \approx \chi^+ \left(\frac{\vec{\omega}_v \cdot \vec{\omega}_h}{\vec{\omega}_v \cdot \vec{n}_0} \right) \begin{cases} \frac{3.535a + 2.181a^2}{1 + 2.276a + 2.577a^2} & \text{si } a < 1.6 \\ 1 & \text{si no} \end{cases} \quad (2.13)$$

Donde $\vec{\omega}_v$ se refiere a la dirección a calcular, $\vec{\omega}_i$ o $\vec{\omega}_o$ según sea el caso, se utiliza la función característica χ definida en la Ecuación 2.11. El valor de a está definido en la Ecuación 2.14, no confundir con el valor de aspereza α .

$$a = \frac{1}{\alpha \tan \theta_v} \quad (2.14)$$

Donde θ_v se refiere al angulo de la dirección $\vec{\omega}_v$ elegida, $\vec{\omega}_i$ o $\vec{\omega}_o$ según sea el caso, con la normal $\vec{n}_0$.

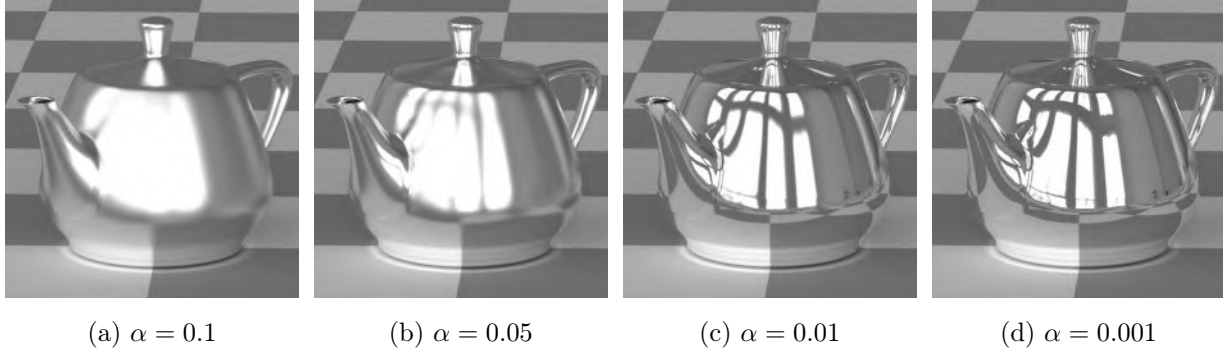


Figura 2.7: Renderizados del modelo de microfacetas [Cook y Torrance 1982], donde se puede apreciar que entre más pequeño es el valor de aspereza α , mayor brillo exhibe el objeto. Escena proporcionada por Bitterli [2016].

Las imágenes renderizadas que se muestran en la Figura 2.7 se hicieron mediante el método PT con 1000 muestras, donde se utilizan el índice de refracción del aire para el medio η_i , y el índice de refracción de la plata η_t , estas medidas se obtienen mediante un gonio-reflectómetro y existen diferentes mediciones, las utilizadas en esta investigación fue la colección de medidas de Cornell [Palik 1998], así como la distribución Beckmann [Beckmann y Spizzichino 1963] para el muestreo de direcciones y probabilidad del modelo de microfacetas.

2.3.2. Energía transmitida

La desventaja de este modelo es que solo tomaba en cuenta la reflexión del material, no obstante en el artículo propuesto por Walter et al. [2007] hace un avance a este modelo, añadiendo la característica de la transmisión diseñando la ecuación f_t . De esta manera se pueden modelar superficies dieléctricas. Su fórmula definida en la Ecuación 2.15, a simple vista es similar a su contraparte de reflexión, con unas leves modificaciones.

$$f_t(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) = \frac{|\vec{\omega}_i \cdot \vec{\omega}_h| |\vec{\omega}_o \cdot \vec{\omega}_h| \eta_t^2 (1 - F(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_h)) G(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_h, \vec{n}_0) D(\vec{\omega}_h, \vec{n}_0)}{|\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}_0| |\vec{\omega}_o \cdot \vec{n}_0| (\eta_i (\vec{\omega}_i \cdot \vec{\omega}_h) + \eta_t (\vec{\omega}_o \cdot \vec{\omega}_h))^2} \quad (2.15)$$

Donde el cálculo de F, G y D se hacen de la misma manera que su contraparte de energía reflejada, pero la dirección media $\vec{\omega}_h$ cambia para la transmisión, y está definida en la

Ecuación 2.16.

$$\vec{\omega}_h = \frac{\eta_i \vec{\omega}_i + \eta_t \vec{\omega}_o}{\|\eta_i \vec{\omega}_i + \eta_t \vec{\omega}_o\|} \quad (2.16)$$

La Ecuación 2.16 solo es válida si la dirección $\vec{\omega}_o$ se encuentra en el hemisferio opuesto a la dirección $\vec{\omega}_i$.

De esta manera se tendría la cantidad de luz total transmitida f_t , a través de una superficie dieléctrica.

2.3.3. Modelo Completo

Para el caso de este material basado en microfacetas, solo basta con sumar ambas estrategias para tener un modelo completo:

$$f_s(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) = f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) + f_t(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) \quad (2.17)$$

De esta manera, la función f_s estaría completa; con su parte reflectiva (f_r) y su parte transmitiva (f_t). Cabe señalar que la ley de la conservación de energía nos menciona que la cantidad de energía transmitida T y reflejada R en un punto en la superficie deben sumar en conjunto 1, como se muestra en la Ecuación 2.18.

$$T + R = 1 \quad (2.18)$$

El muestreo y probabilidad de direcciones dependen de la distribución de microfacetas que se utiliza. Para el caso de Beckmann primero se calcula el vector de la dirección media $\vec{\omega}_h$, su cálculo está definido en la Ecuación 2.19 y 2.20.

$$\phi_h = 2\pi\xi_2, \quad \theta_h = \arctan \sqrt{-\alpha^2 \log(1 - \xi_1)} \quad (2.19)$$

Donde ϕ_h representa el ángulo azimutal y θ_h es el ángulo polar que definen los ángulos de rotación e inclinación de la dirección $\vec{\omega}_h$, mientras que ξ_1 y ξ_2 son valores aleatorios de una distribución uniforme en el rango $[0, 1)$. Para obtener la dirección media $\vec{\omega}_h$ mediante los ángulos se realiza la Ecuación 2.20.

$$\vec{\omega}_h = \begin{bmatrix} \sin \theta_h \cos \phi_h \\ \sin \theta_h \sin \phi_h \\ \cos \theta_h \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

A partir de éste es posible calcular la dirección saliente $\vec{\omega}_o$ mediante la reflexión, como se puede ver en la Ecuación 2.21.

$$\vec{\omega}_o = -\vec{\omega}_i + 2(\vec{\omega}_i \cdot \vec{\omega}_h) \vec{\omega}_h \quad (2.21)$$

Esta dirección tiene una probabilidad p de suceder, definida en la Ecuación 2.22.

$$p(\omega_o, \omega_h) = D(\vec{\omega}_h, \vec{n}_0) \frac{\vec{\omega}_h \cdot \vec{n}_0}{4|\omega_o \cdot \omega_h|} \quad (2.22)$$

El resultado obtenido del modelo completo que cuenta con reflexión y transmisión, pueden apreciarse en la Figura 2.8.



(a) $\alpha = 0.1$

(b) $\alpha = 0.01$

(c) $\alpha = 0.001$

Figura 2.8: Renderizados del modelo de microfacetas mejorado [Walter et al. 2007], dado que se cuenta con transmisión se puede observar dentro del objeto, donde el valor de aspereza α ahora también define que tan transparente será la superficie. Escena proporcionada por Bitterli [2016].

Los renders realizados en la Figura 2.8 se hicieron mediante el método PT con 1000 muestras N , donde se utilizan el índice de refracción del aire para el medio ($\eta_i \leftarrow 1.00028$), y el índice de refracción del vidrio acrílico ($\eta_t \leftarrow 1.49$) [Palik 1998], así como la distribución

Beckmann [Beckmann y Spizzichino 1963] para el muestreo de direcciones $\vec{\omega}$ y probabilidad p del modelo de microfacetas .

Este modelo permite representar objetos más complejos, teniendo un material dieléctrico físicamente correcto, dándoles un aspecto realista. Este modelo no contempla iridiscencia por sí solo, dado que solo existe una única superficie, no se considera una distancia entre superficies, aparte de que la luz es tomada desde un punto de vista geométrico. Por lo que los índices de refracción son iguales sin importar la longitud de onda. En los siguientes capítulos se explicará la importancia de este modelo.

Si se desea obtener iridiscencia es necesario contar con al menos dos superficies y que la luz interaccione internamente entre ambas superficies, además de tomar en cuenta la luz como una onda, con diferentes muestras a lo largo del espectro visible.

2.4. Modelo de Granier

El modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003], proporciona una solución específica para una geometría de dos superficies, donde se tiene una superficie difusa cubierto de una superficie dieléctrica.

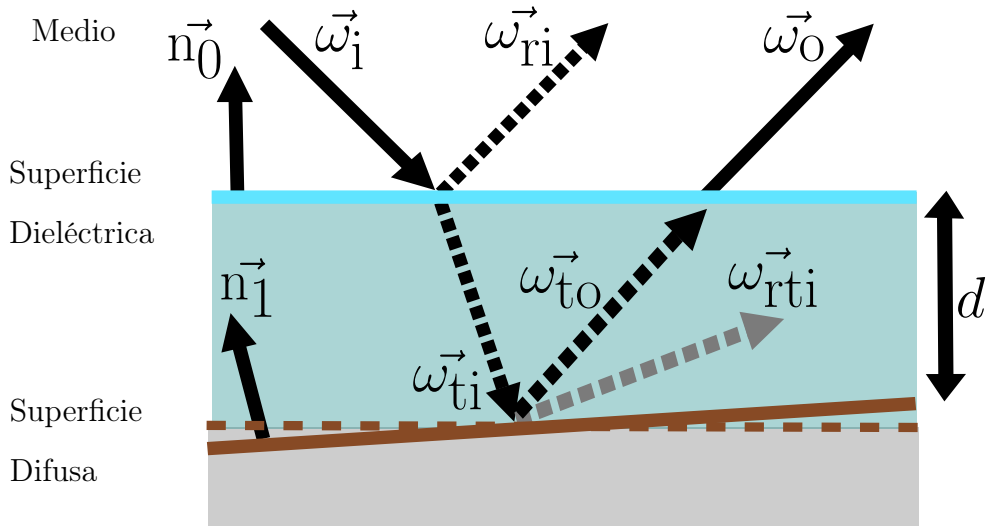


Figura 2.9: Geometría local del modelo, dos superficies no paralelas con sus respectivas normales $\vec{n}$ e índices de refracción η .

El diagrama de la Figura 2.9 muestra como existe una separación d entre ambas superficies,

en la superficie superior se cuenta con las direcciones $\vec{\omega}_i$ y $\vec{\omega}_o$, tanto como la reflexión $\vec{\omega}_{ri}$, mientras que dentro del material se tiene la dirección de transmisión $\vec{\omega}_{ti}$ y $\vec{\omega}_{to}$, como la dirección de reflexión interna $\vec{\omega}_{rti}$.

Este modelo hace dos cálculos de forma separada. El primero consiste en la interacción de la luz entre ambas superficies (difusa y dieléctrica), mientras que la segunda interacción es únicamente de la superficie difusa. Se realiza una suma ponderada para obtener el resultado final, para así crear el modelo completo.

2.4.1. Parte Dieléctrica

El cálculo de la parte dieléctrica se realiza sumando tres fenómenos: reflexión, transmisión y cambio de fase. Se utiliza el modelo propuesto por Phong [1975] para el cálculo de la energía reflejada y transmitida en la primer superficie, la fórmula está definida en la Ecuación 2.23.

$$f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) = F(\vec{\omega}_i, \vec{n}_0) (\vec{\omega}_{ri} \cdot \vec{\omega}_o)^{e_0} \quad (2.23)$$

Se realiza el cálculo de producto punto entre dos direcciones, la dirección reflejada ω_{ri} y la dirección saliente $\vec{\omega}_o$. Si el ángulo entre dichas direcciones es pequeño o cercano a cero, el producto punto tendrá un valor alto y viceversa. Finalmente, el exponente e_0 expresa qué tan brillante se verá el material, este término define la aspereza del modelo (similar a α en el modelo de microfacetas), entre más alto, más concentrado y brillante, pero entre más pequeño, más difuso y extendido. Este término debe multiplicarse por una función que proporcione la cantidad de luz que se logró reflejar, esto lo hace mediante la aproximación al Fresnel F propuesta por Schlick [1994], la cual está definida en la Ecuación 2.24.

$$F(\vec{\omega}_i, \vec{n}_0) = f + (1 - f)(1 - (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}_0))^5 \quad (2.24)$$

El coeficiente fresnel f está definido en la Ecuación 2.25.

$$f = \left(\frac{\eta_i[\lambda] - \eta_t[\lambda]}{\eta_i[\lambda] + \eta_t[\lambda]} \right)^2 \quad (2.25)$$

Donde $\eta_i[\lambda]$ y $\eta_t[\lambda]$ son los índices de refracción de la luz del medio y del material dieléctrico respectivamente, con un valor diferente para cada canal λ RGB.

El cálculo de la energía transmitida se realiza mediante la conservación de la energía, la cual indica que la energía total reflejada R y transmitida T es igual a 1, de esta manera se puede despejar T, como se muestra en la Ecuación 2.26.

$$T = 1 - R \quad (2.26)$$

Pero para respetar el camino completo de la luz, este término debe multiplicarse por la energía transmitida de adentro del material hacia afuera, con dirección transmitida de $\vec{\omega}_o$ ($\vec{\omega}_{t_o}$), dando como resultado la Ecuación 2.27.

$$f_t(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) = (1 - F(\vec{\omega}_i, \vec{n}_0)) (\vec{\omega}_{rti} \cdot -\vec{\omega}_{t_o})^{e_1} (1 - F(\vec{\omega}_{t_o}, \vec{n}_0)) \quad (2.27)$$

Si se observa detenidamente la fórmula, cuenta con tres componentes multiplicándose, el primero indica la cantidad de energía que se transmitió por $\vec{\omega}_i$, el segundo expresa la energía reflejada por las direcciones $\vec{\omega}_{rti}$ y $\vec{\omega}_{t_o}$ con su respectivo exponente e_1 que controla la rugosidad de la reflexión interna. Finalmente, el último representa cuanta energía se transmitió con dirección $\vec{\omega}_{t_o}$, de esta manera se estaría respetando el camino de la luz, en la Figura 2.10 se puede ver el diagrama simplificado para mayor entendimiento del camino que toma la luz.

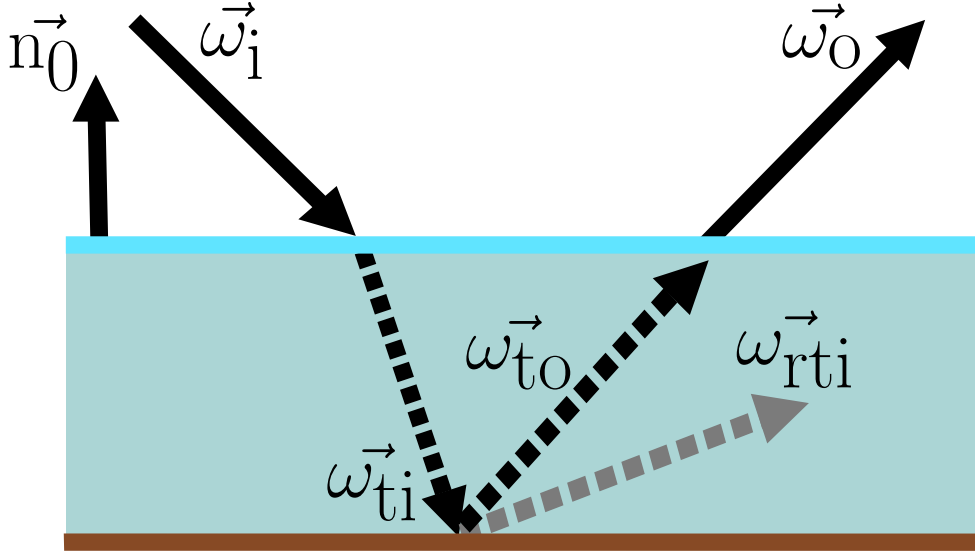


Figura 2.10: Camino de la luz transmitida dentro del material de forma simplificada, en el modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003].

El cambio de fase se hace mediante la formulación propuesta por Born y Wolf [1999], con una pequeña modificación donde las dos superficies pueden no estar alineadas paralelamente. Este cambio de fase está expresado en la Ecuación 2.28.

$$\Phi(\vec{\omega}_i, \vec{n}_0) = \pi \frac{\eta_t[\lambda] d}{\lambda} ([\vec{\omega}_{ti} + \vec{\omega}_{to}] \cdot -\vec{n}_0) \quad (2.28)$$

En la fórmula 2.28, el producto punto multiplicado por el término $\frac{d}{\lambda}$ representa la distancia recorrida por el rayo entre las superficies, $\eta_t[\lambda]$ es el índice de refracción que depende del canal RGB a utilizar, mientras que λ por si sola corresponde al valor de la longitud de onda en nm según su canal, para obtener la interferencia o la energía total que mutó es mediante la Ecuación 2.29.

$$f_\Phi(\vec{\omega}_i, \vec{n}_0) = 2 \cos(2 \Phi(\vec{\omega}_i, \vec{n}_0)) \sqrt{f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) \cdot f_t(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0)} \quad (2.29)$$

Finalmente, la fórmula para la superficie dieléctrica completa está definida en la Ecuación 2.30.

$$f_s = f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) + f_t(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) + f_\Phi(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) \quad (2.30)$$

Esta fórmula contempla la energía total reflejada f_r , la energía total transmitida f_t y la energía que mutó f_ϕ . De esta manera se obtiene el cálculo total para la parte dieléctrica.

2.4.2. Parte Difusa

El cálculo de la parte difusa se realiza mediante la extensión de la parte dieléctrica, pero asumiendo varios factores para obtener una fórmula aproximada. El cálculo de la energía reflejada y transmitida se hace mediante el modelo Phong [1975], donde los exponentes e_0 y e_1 se asignan en cero, lo que significa que el material es difuso perfecto. Por tanto, se utiliza la conservación de energía para calcular la transmisión difusa T_d a partir de la reflexión difusa R_d , como se observa en la Ecuación 2.31.

$$T_d = 1 - R_d \quad (2.31)$$

De tal manera simplificando, se tiene la Ecuación 2.32.

$$T_d = \frac{80}{21} \frac{\eta_i[\lambda] \eta_t[\lambda]}{[\eta_t[\lambda] + \eta_i[\lambda]]^2} \quad (2.32)$$

Para el cálculo del cambio de fase Φ_d se aproxima utilizando únicamente la distancia entre ambas superficies d , despreciando la dirección y la normal en la superficie, se tiene la Ecuación 2.33

$$\Phi_d(\vec{\omega}_i, \vec{n}_0) = \pi \frac{\eta_t[\lambda] d}{\lambda} \quad (2.33)$$

Finalmente con estos cambios, el cálculo total para la parte difusa f_d está definida en la Ecuación 2.34.

$$f_d = 1 + 2 \cos \left(4\pi \frac{\eta_t[\lambda] d}{\lambda} \right) \sqrt{T_d(1 - T_d)} \quad (2.34)$$

Esta fórmula es aproximada, por que al ser una superficie difusa, exhibe reflexión uniforme en toda su superficie, tal y como se puede apreciar en la Figura 2.5a. La obtención del color dependerá únicamente de los índices de refracción y no de las direcciones proporcionadas, de tal manera que si los índices de refracción siempre son iguales, la parte difusa será un

coeficiente con el mismo valor alrededor de toda la superficie.

2.4.3. Modelo completo

Para un modelo completo se pueden sumar ambas partes: dieléctrica y difusa, su cálculo está definido en la Ecuación 2.35.

$$w_s \cdot f_s + w_d \cdot f_d \quad (2.35)$$

Donde w_s y w_d indican el peso de la parte dieléctrica y difusa respectivamente. Éstos varían dependiendo de las características del material a replicar, porque al darle un peso diferente a cada canal, se puede obtener un color en específico.

En conclusión, el modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003] cuenta con una gran flexibilidad, dado que al tener su cálculo bien definido y separado, se pueden obtener múltiples resultados variando sus parámetros: las normales de la superficie $\vec{n}$, los índices de refracción η , distancia entre ambas superficies d , la longitud de onda λ , el peso w_s y w_d en la parte especular y difusa respectivamente.

2.5. Modelo de Plástico Áspero

El modelo propuesto por Jakob [2010] cuenta con la misma configuración que la propuesta por Granier y Heidrich [2003]: una superficie difusa cubierta de una superficie dieléctrica. Cuándo la luz impacta este material, una porción se refleja y otra se transmite. Posteriormente, la luz que se transmitió puede quedar atrapada durante múltiples rebotes hasta que esta finalmente sale del material.

La diferencia es que esta propuesta combina la parte dieléctrica y difusa, utilizando el modelo de microfacetas [Walter et al. 2007] para el cálculo de la reflexión y transmisión de la primer superficie.

2.5.1. Energía reflejada

La energía total reflejada del modelo, corresponde únicamente a la energía reflejada de la superficie dieléctrica, dado que la luz primero impacta esta superficie y a partir de ella es que una porción se refleja y otra se transmite dentro del material. Su cálculo está definido en la Ecuación 2.36.

$$f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) = w_s \frac{F(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_h) G(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_h, \vec{n}_0) D(\vec{\omega}_h, \vec{n}_0)}{4|\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}_0||\vec{\omega}_o \cdot \vec{n}_0|} \quad (2.36)$$

Dado que la fórmula es únicamente la energía reflejada de la primer superficie, corresponde a la misma Ecuación 2.6 de f_r del modelo de microfacetas [Walter et al. 2007], multiplicandola únicamente por el peso de la parte especular w_s , lo cual también define su color.

2.5.2. Energía transmitida

Para el caso de este modelo se tiene una superficie difusa debajo, lo cual no permite la transmisión al otro lado del material. Por lo que, la energía transmitida se refiere a la energía que ingresó al material, interactuó dentro de el y logró salir.

Para calcular esta energía, se comenzará con la primer interacción con la superficie dieléctrica, donde se impacta la superficie con una dirección entrante $\vec{\omega}_i$ y se trasmite mediante la dirección $\vec{\omega}_{ti}$. Dado que se desea obtener la energía total transmitida en esta interacción, no basta evaluar una única vez la función f_t , es necesario hacerlo para cada dirección saliente $\vec{\omega}_{ti}$ posible en el hemisferio, como se puede ver en la Figura 2.11a), por lo que su cálculo sería la integral definida en la Ecuación 2.37.

$$T_{12}(\vec{\omega}_i, \vec{n}_0) = \int_{\Omega} f_t(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_{ti}, \vec{n}_0) d\vec{\omega}_{ti} \quad (2.37)$$

Dado que la superficie es dieléctrica basada en microfacetas, la función f_t es la misma propuesta en el modelo propuesto por Walter et al. [2007], en la Ecuación 2.15.

Continuando con el camino de la luz, esta impacta con la superficie difusa, la cual únicamente cuenta con reflexión, el cálculo de la reflexión total de la superficie difusa es

más compleja, dado que es uniforme en todo el hemisferio. Jakob [2010] opta por utilizar una metodología diferente, utilizando la lógica de la conservación de la energía, donde la reflexión difusa R_d es igual a la que no logró transmitirse en la superficie superior T_d , como se puede observar en la Ecuación 2.38.

$$R_d = 1 - T_d \quad (2.38)$$

Pero, para el caso de la energía que se logró transmitir de forma difusa, no existe una dirección única entrante $\omega_{rti}^{\vec{}}$, tiene múltiples y de igual manera la dirección saliente $\omega_{trti}^{\vec{}}$ es uniforme en todo el hemisferio, por lo que se calcularía una integral doble, la cual está definida en la Ecuación 2.39.

$$R_d = 1 - \int_{\Omega} \left(\int_{\Omega} f_t(\omega_{rti}^{\vec{}}, \omega_{trti}^{\vec{}}, \vec{n}_0) d\omega_{trti}^{\vec{}} \right) d\omega_{rti}^{\vec{}} \quad (2.39)$$

Se puede observar en la Ecuación 2.39 una integral doble que corresponde a la transmisión dada todas las direcciones incidentes ω_{rti} y todas las direcciones salientes ω_{trti} , como se puede observar en la Figura 2.11c, dicho de otro modo es la energía total transmitida de forma difusa.

Por último, la interacción final es la energía que logró salir por la dirección $\vec{\omega}_o$. Sin embargo por la naturaleza de la reflexión difusa, no es posible saber con certeza la dirección incidente que generó la dirección saliente $\vec{\omega}_o$. Por lo que se opta por otra estrategia para obtener la energía transmitida hacia fuera del material. Gracias a que el modelo de plástico áspero cuenta con algo llamado bidireccionalidad, se puede realizar el cálculo de la transmisión inversa y conectar el camino de la luz desde ambos extremos. Entonces, dada la dirección incidente $\vec{\omega}_o$ y múltiples direcciones salientes ω_{to} , como se puede observar en la Figura 2.11b, la integral resultante se puede apreciar en la Ecuación 2.40.

$$T_{21}(\vec{\omega}_o, \vec{n}_0) = \int_{\Omega} f_t(\vec{\omega}_o, \omega_{to}^{\vec{}}, \vec{n}_0) d\omega_{to}^{\vec{}} \quad (2.40)$$

Se puede observar gran similitud en la Ecuación 2.37 y 2.40, esto se debe a que solo cambia la dirección incidente y saliente del material.

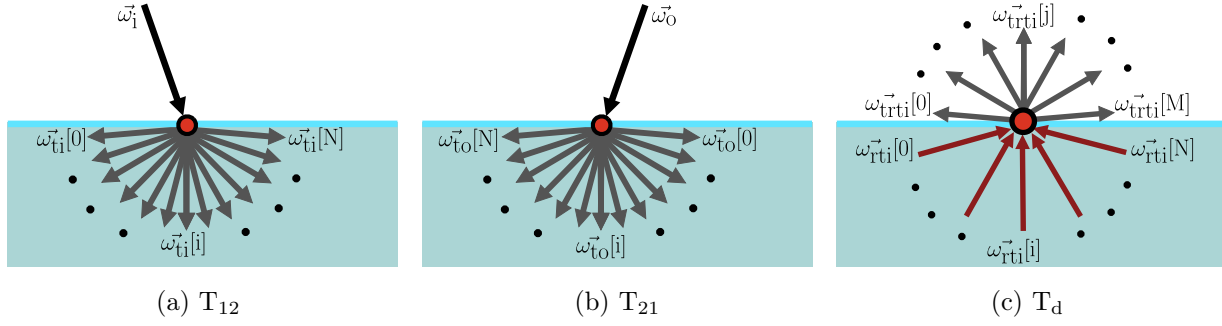


Figura 2.11: Diagramas representativos de las ecuaciones de transmisión en la superficie dieléctrica, donde se puede observar que para T_{12} y T_{21} se tienen múltiples posibles direcciones salientes, mientras que en T_d aparte de las direcciones salientes se tienen múltiples direcciones entrantes.

El siguiente paso es resolver las integrales y dado que estas no tienen forma cerrada, es necesario evaluarlas de forma numérica, la mejor manera de hacerlo es con el integrador Monte Carlo [Shirley, Wang y Zimmerman 1996], para el caso de T_{12} y T_{21} su forma de resolver es similar y se puede apreciar en la Ecuación 2.41 y la Ecuación 2.42 respectivamente.

$$T_{12}(\vec{\omega}_i, \vec{n}_0) = \sum_{i=0}^N \frac{f_t(\omega_i, \omega_{ti}[i], n_0)}{p(\omega_{ti})} \quad (2.41)$$

$$T_{21}(\vec{\omega}_o, \vec{n}_0) = \sum_{i=0}^N \frac{f_t(\omega_o, \omega_{to}[i], n_0)}{p(\omega_{to})} \quad (2.42)$$

Pero para el caso de R_d es más complejo, por que aparte de no tener tampoco forma cerrada es una integral doble. Por lo que se puede utilizar el método Monte Carlo [Shirley, Wang y Zimmerman 1996], pero de forma anidada para resolverla, su cálculo está definido en la Ecuación 2.43.

$$R_d = 1 - \left(\sum_{i=0}^N \frac{\sum_{j=0}^M \frac{f_t(\omega_{rti}[i], \omega_{trti}[j], \vec{n}_0)}{p(\omega_{trti}[j])}}{p(\omega_{rti}[i])} \right) \quad (2.43)$$

Donde N es el número de muestras para la dirección de entrada ω_{rti} , mientras que M es el número de muestras para la dirección de salida ω_{trti} y ambas cuentan con su respectiva probabilidad p .

Finalmente se tendrían las tres interacciones entre las superficies del material compuesto, la energía que se transmitió T_{12} desde afuera hacia dentro del material con dirección $\vec{\omega}_i$ como se puede observar en la Figura 2.11a, la energía que se transmitió T_{21} con dirección $\vec{\omega}_o$ presentada en la Figura 2.11b, la energía que logró salir del material de forma difusa T_d ilustrada en la Figura 2.11c.

A pesar de realizar la evaluación con el modelo Monte Carlo [Shirley, Wang y Zimmerman 1996], si se desea obtener precisión, se elevaría excesivamente el tiempo de ejecución por la cantidad de muestras, por lo que se opta por realizar una tabla de datos precomputados, lo cual permite almacenar el valor de T_{12} , T_{21} en una tabla y T_d en otra.

Para llenar la primer tabla para T_{12} y T_{21} solo es necesario variar 3 parámetros: el índice de refracción η , la rugosidad del material α y el coseno de la dirección incidente $\cos \theta$. Para el caso de T_d se crearía una tabla separada bidimensional, dado que no es necesario almacenar la dirección incidente, por que su cálculo es el promedio con todas las direcciones incidentes $\vec{\omega}_{rti}$ y salientes $\vec{\omega}_{trti}$ en el hemisferio, como se puede apreciar en la Figura 2.11c.

De esta manera, las tablas solo se necesitan llenar una única ocasión, antes de iniciar el proceso de renderizado.

Para obtener el valor de la tabla de datos precomputadas, es necesario proporcionar los índices dependiendo de la energía a solicitar, como se puede observar en la Tabla 2.1.

Valor	Índice de Refracción	Aspereza del material	Dirección incidente
T_{12}	$\frac{\eta_i}{\eta_t}$	α	$\cos \theta_i$
T_{21}	$\frac{\eta_i}{\eta_t}$	α	$\cos \theta_o$
T_d	$\frac{\eta_t}{\eta_i}$	α	-

Tabla 2.1: Parametros de entrada para obtener un valor, de la tabla de datos precomputados.

Es posible que para índices específicos, el valor exacto no exista en la tabla de datos, para solucionarlo se utiliza el método de interpolación tri-cúbica [Press et al. 2007], que con ayuda de los vecinos cercanos obtiene una aproximación. De forma resumida, su forma de calcular se puede apreciar en la Ecuación 2.44.

$$T(\eta, \alpha, \cos \theta) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 w_i(\eta) w_j(\alpha) w_k(\cos \theta) V_{ijk} \quad (2.44)$$

Donde V_{ijk} son los valores de los vecinos más cercanos en la tabla de datos, mientras que w_i , w_j y w_k son los pesos cúbicos de cada uno de los parámetros, que se calculan dependiendo de que tan cerca está el índice. La ecuación 2.44 está simplificada, dado que para cada dimensión de la tabla, se realiza una interpolación cúbica como se muestra en la Ecuación 2.45.

$$f(t) = w_0(t) V_0 + w_1(t) V_1 + w_2(t) V_2 + w_3(t) V_3 \quad (2.45)$$

Donde V_0, V_1, V_2, V_3 son los valores de los vecinos más cercanos y para calcular los pesos $w_0(t)$, $w_1(t)$, $w_2(t)$ y $w_3(t)$ se hace mediante el metodo *Catmull-Rom* [Catmull y Rom 1974], como se pueden apreciar en las ecuaciones 2.46 - 2.49.

$$w_0(t) = -0.5t + t^2 - 0.5t^3 \quad (2.46)$$

$$w_1(t) = 1 - 2.5t^2 + 1.5t^3 \quad (2.47)$$

$$w_2(t) = 0.5t + 2t^2 - 1.5t^3 \quad (2.48)$$

$$w_3(t) = -0.5t^2 + 0.5t^3 \quad (2.49)$$

Donde t representa la posición relativa entre la celda anterior y siguiente, definido en la Ecuación 2.50.

$$t = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (2.50)$$

Donde x es el valor deseado, mientras que x_1 es el vecino más cercano inferior y x_2 el vecino más cercano superior.

Para el caso de T_d solo se realizarían dos polarizaciones cúbicas, como se puede observar en la Ecuación 2.51.

$$T_d(\eta, \alpha) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 w_i(\eta) w_j(\alpha) V_{ij} \quad (2.51)$$

El cálculo de la Ecuación 2.51 es similar a la Ecuación 2.44, pero en lugar de realizar la polarización para tres dimensiones, se haría únicamente para dos.

Dado que los parámetros no dependen de otros objetos de la escena, se puede utilizar la misma tabla para renderizar objetos diferentes, es cuestión del usuario definir cuantas muestras desea almacenar en su tabla de datos. Para el caso de la primer tabla, solo se realizan 100 muestras en los rangos posibles de cada parámetro, obteniendo una tabla tridimensional de $100 \times 100 \times 100$, para la segunda tabla también se realizaron 100 muestras, pero la tabla fue bidimensional de 100×100 . Cabe señalar que, se utiliza la notación en cursiva (T y T_d) para referirse a la tabla de datos pre-computados.

Por lo que tomando en cuenta el cálculo de la tabla de datos precomputados, la evaluación de T_{12} , T_{21} y R_d , estarían definidas en las Ecuaciones 2.52, 2.53 y 2.54 respectivamente.

$$T_{12}(\vec{\omega}_i, \vec{n}_0) = T\left(\frac{\eta_i}{\eta_t}, \alpha, \cos \theta_i\right) \quad (2.52)$$

$$T_{21}(\vec{\omega}_o, \vec{n}_0) = T\left(\frac{\eta_i}{\eta_t}, \alpha, \cos \theta_o\right) \quad (2.53)$$

$$R_d = 1 - T_d\left(\frac{\eta_t}{\eta_i}, \alpha\right) \quad (2.54)$$

Finalmente, la energía total transmitida dentro del material hacia afuera se puede apreciar en la Ecuación 2.55.

$$f_t(\vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i, \vec{n}_0) = w_d \frac{T_{12}(\vec{\omega}_i, \vec{n}_0) T_{21}(\vec{\omega}_o, \vec{n}_0) (\vec{\omega}_o \cdot \vec{n}_0)}{(1 - R_d) \pi \eta_t^2} \quad (2.55)$$

2.5.3. Modelo final

Sumando la energía reflejada y la energía transmitida, el modelo completo sería el siguiente:

$$f_s(\vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i, \vec{n}_0) = w_s \frac{F(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_h) G(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_h, \vec{n}_0) D(\vec{\omega}_h, \vec{n}_0)}{4|\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}_0||\vec{\omega}_o \cdot \vec{n}_0|} + w_d \frac{T_{12}(\vec{\omega}_i, \vec{n}_0) T_{21}(\vec{\omega}_o, \vec{n}_0) (\vec{\omega}_o \cdot \vec{n}_0)}{(1 - R_d)\pi \eta_t^2} \quad (2.56)$$

En la Figura 2.12 se puede apreciar imágenes renderizadas de este modelo.

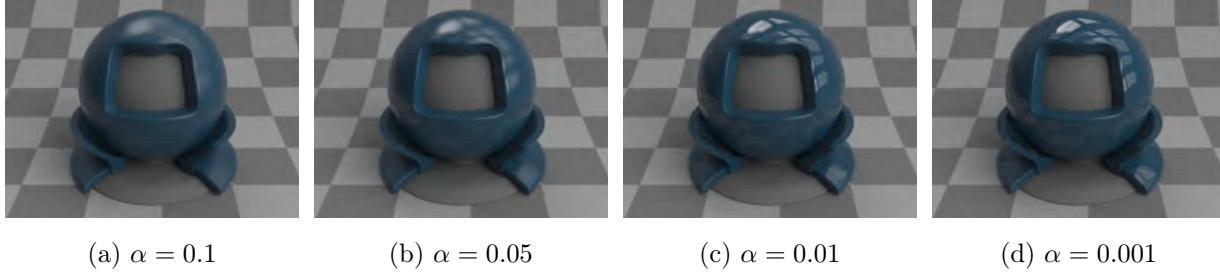


Figura 2.12: Imágenes renderizadas del modelo de plástico áspero [Jakob et al. 2014], donde se puede apreciar que un valor pequeño de aspereza α muestra mayor brillo, como si hubieran pulido el objeto, mientras que un valor alto representa como si se tratase de una superficie opaca.

Los renders realizados en la Figura 2.12 se hicieron mediante el método PT con 1000 muestras, donde se utiliza el índice de refracción del aire para el medio (1.00028), y el índice de refracción del material polipropileno (1.49), así como la distribución Beckmann [Beckmann y Spizzichino 1963] para el muestreo de direcciones y probabilidad del modelo de microfacetas.

En conclusión el modelo de plástico áspero es capaz de resolver la transmisión total, donde se sacrifica la precisión pero se ahorra tiempo de ejecución al utilizar una tabla de datos precomputados. No obstante, este método tampoco presenta iridiscencia dado que no considera la luz como onda y cambio de fase.

2.6. Conclusiones

A lo largo de este capítulo se ha explicado el tratamiento de la luz dentro de una escena tridimensional, así como su interacción con los objetos acorde al material que los compone.

Los materiales que se analizaron fueron el modelo Microfacet [Walter et al. 2007], que simula de manera físicamente más fiel la interacción de la luz con una superficie

dieléctrica. Por otro lado, el modelo de Granier [Granier y Heidrich 2003], presenta un material compuesto por una superficie dieléctrica y una difusa. Que logra separar su cálculo en la luz que refleja el material y la luz que se transmite adentro de la primer superficie, la luz interacciona al interior y finalmente logra salir, aparte de que también toma en cuenta el cambio de fase, provocando de esta manera la iridiscencia. Al final, se tiene el modelo de Plástico Áspero [Jakob 2010], el cual también toma en cuenta la interacción de la luz entre ambas superficies, utilizando una tabla de datos precomputados para minimizar el tiempo de ejecución y el modelo Microfacet [Walter et al. 2007] para darle mayor realismo.

Habiendo comprendido el funcionamiento de estos modelos, se pueden utilizar para proponer un nuevo material con ambas superficies (difusa y dieléctrica), que exhiba iridiscencia con un tratamiento de la luz más realista.

Capítulo 3

Modelo Propuesto

En este capítulo se realiza la implementación del modelo base [Granier y Heidrich 2003] así como la modificación utilizando el modelo de plástico áspero propuesto por Jakob [2010]. Se presentan las ecuaciones, las limitantes y la implementación realizada.

3.1. Implementación del modelo de Granier

Dado que no existía implementación del código base o pseudo código del modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003], se realizó la implementación con base en las fórmulas detalladas en su artículo.

Cabe señalar que con el propósito de simplicidad y flexibilidad se hicieron los siguientes ajustes:

- Desde el punto de vista de la intersección, todas las direcciones son salientes de la superficie (incluyendo aquellas que por lógica deberían entrar a la superficie).
- Se tiene la opción de pasar las normales $\vec{n}_0$ y $\vec{n}_1$ como fijas en coordenadas cartesianas, esféricas o a través de un mapa de normales, donde se hace el mapeo de una textura donde el valor RGB se asigna a (x, y, z) de la normal.
- Se puede proporcionar la distancia d entre las superficies, como un valor flotante constante o una textura en escalas de grises, donde se hace el mapeo para obtener un valor.

- El cálculo de las direcciones transmitidas se hizo mediante las ecuaciones de transmisión especular definidas en las Ecuaciones 3.1 y 3.2 respectivamente.

$$\vec{\omega}_{ti} = \begin{pmatrix} -\frac{\eta_i}{\eta_t} \omega_{o.x} \\ \frac{\eta_i}{\eta_t} \omega_{o.y} \\ -\cos \theta_{ti} \end{pmatrix}, \quad \cos \theta_{ti} = \sqrt{1 - \frac{\eta_i^2}{\eta_t^2} (1 - (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}_0))} \quad (3.1)$$

$$\vec{\omega}_{to} = \begin{pmatrix} -\frac{\eta_i}{\eta_t} \omega_{i.x} \\ \frac{\eta_i}{\eta_t} \omega_{i.y} \\ -\cos \theta_{to} \end{pmatrix}, \quad \cos \theta_{to} = \sqrt{1 - \frac{\eta_i^2}{\eta_t^2} (1 - (\vec{\omega}_o \cdot \vec{n}_0))} \quad (3.2)$$

Donde $\omega_{o.x}$ y $\omega_{o.y}$ es el valor de los componente x y y de la dirección saliente ω_o , mientras que $\omega_{i.x}$ y $\omega_{i.y}$ es el valor de los componente x y y de la dirección entrante ω_i .

- Mientras que las direcciones reflejadas se hicieron mediante la ecuación de reflexión especular, definidas en las Ecuaciones 3.3 y 3.4 respectivamente.

$$\vec{\omega}_{ri} = -\vec{\omega}_i + 2 (\vec{n}_0 \cdot \vec{\omega}_o) \vec{n}_0 \quad (3.3)$$

$$\vec{\omega}_{rti} = -\vec{\omega}_{ti} + 2 (\vec{n}_0 \cdot -\vec{\omega}_{to}) \vec{n}_1 \quad (3.4)$$

Cabe señalar que el modelo de Granier y Heidrich [2003] no proporciona una forma específica para calcular sus direcciones reflejadas y transmitidas en su superficie dieléctrica. Estas son las direcciones propuestas, ya que al ser las direcciones perfectas de una superficie especular, pueden ser útiles para realzar el cambio de fase y la interacción interna de la luz, a cambio de no aportar mucho al cálculo difuso.

3.1.1. Muestreo y probabilidad

El modelo de Granier y Heidrich [2003] no incluye muestreo y probabilidad de direcciones, es necesario asignárselo si se desea tener un modelo completo y útil, por lo que se optó por

utilizar el propuesto en Mitsuba [Jakob 2010] para el modelo Phong [Phong 1975], el cual mezcla muestreo especular y difuso.

El material cuenta con dos superficies: difusa y dieléctrica, por lo que es necesario incluir un muestreo que contemple ambas. Primero se realizará el cálculo de los ángulos de la dirección muestreada, como se puede observar en la Ecuación 3.5.

$$\sin \theta_s = \sqrt{1 - \xi_1^{\frac{2}{e_0+1}}}, \quad \cos \theta_s = (1 - \xi_2)^{\frac{1}{e_0+1}}, \quad \phi_s = 2\pi\xi_1 \quad (3.5)$$

Donde ξ_1 y ξ_2 son dos muestras aleatorias comprendidas en un intervalo $[0.0, 1.0)$. La dirección reflejada en la superficie dieléctrica $\vec{\omega}_s$ se calcula con estos valores, como se puede apreciar en la Ecuación 3.6.

$$\vec{\omega}_s = \begin{bmatrix} \sin \theta_s \cos \phi_s \\ \sin \theta_s \sin \phi_s \\ \cos \theta_s \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

La probabilidad de esta dirección está definida en la Ecuación 3.7.

$$p_s(\vec{\omega}_o) = (\vec{\omega}_o \cdot \vec{\omega}_{ri})^{e_0} \cdot \frac{e_0 + 1}{2\pi} \quad (3.7)$$

Para la parte difusa, Jakob [2010] utiliza una estrategia llamada coseno hemisférico, como su nombre lo dice es un muestreo que depende del coseno del ángulo entre la dirección incidente y la dirección saliente. Para coordenadas esféricas se tiene que el radio r y el ángulo ϕ se calculan según el comportamiento de r_1 y r_2 , definidas en las Ecuaciones 3.8 y 3.9 respectivamente.

$$r_1 = 2\xi_1 - 1, \quad r_2 = 2\xi_2 - 1 \quad (3.8)$$

$$r, \phi = \begin{cases} 0, 0 & \text{si } r_1 = r_2 = 0 \\ r_1, \frac{\pi}{4} \frac{r_2}{r_1} & \text{si } r_1 > r_2 \\ r_2, \frac{\pi}{2} - \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{\pi}{4} & \text{si } r_2 > r_1 \end{cases} \quad (3.9)$$

Se puede calcular la dirección difusa $\vec{\omega}_d$ a partir de estos valores, con la Ecuación 3.10.

$$\vec{\omega}_d = \begin{bmatrix} r \cos \phi \\ r \sin \phi \\ \sqrt{1 - (r \cos \phi)^2 - (\sin \phi)^2} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Donde la probabilidad de esta dirección está dada en la Ecuación 3.11.

$$p_d(\vec{\omega}_o) = \frac{1}{\pi} \cdot (\vec{\omega}_o \cdot \vec{n}_1) \quad (3.11)$$

Aunque no se pueden tomar en cuenta ambas direcciones ($\vec{\omega}_s$ y $\vec{\omega}_d$) como dirección saliente $\vec{\omega}_o$, se puede optar por una metodología que decida que dirección tomar. Dado que se utiliza la conservación de energía, puede ser dependiendo de la cantidad de energía reflejada, debido a que está comprendida entre 0 y 1, por lo que su formula está definida en la Ecuación 3.12.

$$\vec{\omega}_o = \begin{cases} \vec{\omega}_s & \text{si } \xi \leq f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) \\ \vec{\omega}_d & \text{si } \xi > f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) \end{cases} \quad (3.12)$$

Dependiendo del valor de f_r y ξ se puede utilizar una dirección u otra, para el caso de la probabilidad se pueden sumar ambas metodologías, la parte dieléctrica y la difusa, como se puede apreciar en la Ecuación 3.13.

$$p = p_s(\vec{\omega}_o) + p_d(\vec{\omega}_o) \quad (3.13)$$

La implementación del modelo base ahora es completamente funcional, con su parte de evaluación, muestreo y probabilidad.

3.1.2. Resultados

Las parámetros fueron tomadas de los ejemplos del artículo propuesto por Granier y Heidrich [2003].

parámetros	valor
$\vec{n}_0$	[0.24192, 0, 0.97030] (Desviación de 14°)
$\vec{n}_1$	(0.0, 0.0, 1.0)
η_i	(1.0, 1.0, 1.0)
η_t	(1.5, 1.6, 1.8)
d	76
λ	(645.0, 525.0, 445.0)
e_0	130
e_1	130
$spp (N)$	1024

Tabla 3.1: Parámetros utilizados en la imagen renderizada con el modelo [Granier y Heidrich 2003].

Donde spp (*Samples Per Pixel*) son las muestras por pixel y es el equivalente a N para el método Monte Carlo [Shirley, Wang y Zimmerman 1996]. Las imágenes renderizadas, utilizando los parámetros de la tabla 3.1, se pueden observar en la Figura 3.1.



(a) Modelo de Granier [Granier y Heidrich 2003] con iluminación directa en una escena simple



(b) Modelo de Plástico Áspero [Jakob 2010] con iluminación directa en una escena simple



(c) Modelo de Granier [Granier y Heidrich 2003] con iluminación global en una escena compleja



(d) Modelo de Plástico Áspero [Jakob 2010] con iluminación global en una escena compleja

Figura 3.1: Comparación del modelo de Granier [Granier y Heidrich 2003] en la parte izquierda, y el modelo de Plástico Áspero [Jakob 2010] en la parte derecha, donde se puede apreciar el mismo objeto con iluminación directa y global. Escena proporcionada por Bitterli [2016].

En las dos imágenes de la parte de arriba de la Figura 3.1, se renderizó un dragón en

una mesa de madera con un mapa ambiental sin otros objetos cercanos, con iluminación directa, de parte izquierda se utilizó el modelo Granier [Granier y Heidrich 2003], el cual si se observa detenidamente cuenta con iridiscencia muy leve, en cambio la imagen de la derecha es la misma escena pero ahora con el modelo Plástico Áspero [Jakob 2010], el cual no presenta diferentes tonalidades, pero se puede apreciar como la luz se ve más natural en el objeto.

En las dos imágenes de la parte inferior de la Figura 3.1, se tiene la misma comparativa pero ahora el dragón se encuentra dentro de una habitación con paredes, piso y otros objetos cercanos, con el mapa ambiental, que solo ilumina a través de las ventanas, por eso se agregó una fuente de área esférica para obtener mayor iluminación, utilizando iluminación global cambia bastante el resultado, ahora el modelo de Granier [Granier y Heidrich 2003] muestra mayores tonalidades en las zonas con mayor brillo, mientras que el modelo de Plástico Áspero mantiene su realismo incluso en zonas con iluminación diferente. Por eso es necesario utilizar ambos modelos, para utilizar lo mejor de cada uno.

Una vez completa la implementación de los modelos previos, con su respectivo muestreo y probabilidad, se puede continuar con el modelo propuesto, el cual se explicará en la siguiente sección.

3.2. Modelo Propuesto

Si se desea optar por un resultado más realista para la superficie dieléctrica, se puede basar en el modelo de microfacetas modificado propuesto por Walter et al. [2007], que cuenta con evaluación, muestreo y probabilidad físicamente fundamentadas.

Para saber como aplicarlo al modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003] que ya actualmente está implementado, se debe considerar qué modificaciones hacer, el modelo tiene el cálculo de la energía reflejada f_r y energía transmitida f_t . En estos cálculos es donde se utiliza el modelo de Phong [1975] para simular una superficie dieléctrica, que carece de fundamentos físicos rigurosos. Por este motivo, al remplazar este modelo por el de microfacetas, se puede mejorar significativamente la fidelidad del material.

Haciendo la comparativa para la parte reflejada se tiene que ambos cuentan con el

cálculo de la reflexión Fresnel, pero en el resto del cálculo el modelo Phong [1975] funciona con el coseno elevado a su exponente. En cambio, el modelo de microfacetas hace el cálculo con la distribución de las microfacetas, verificando cuales son visibles dependiendo de la dirección ($\vec{\omega}_i$ y $\vec{\omega}_o$).

Las similitud que se pueden observar para la parte transmitida T es únicamente el término Fresnel ($1 - F$), pero hay que hacer un recuento del camino que se sigue. El modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003] toma en cuenta la luz transmitida de $\vec{\omega}_i$ y $\vec{\omega}_o$, así como la cantidad de luz que logra reflejarse dentro del material con las direcciones $\vec{\omega}_{rti}$ y $\vec{\omega}_{to}$, pero de forma difusa (múltiples direcciones). Para el nuevo modelo es necesario proponer una nueva ecuación para la interacción de la luz, con una superficie externa de microfacetas y una superficie interna difusa, que tome en cuenta la transmisión de afuera hacia dentro del material, la reflexiones internas entre ambas superficies y posteriormente la transmisión de adentro del material hacia fuera.

3.2.1. Parametrización

En el artículo de materiales compuesto por múltiples superficies, propuesto por Jakob et al. [2014], proporciona una fórmula cerrada en la interacción entre dos superficies especulares. Con el propósito de encontrar también una fórmula cerrada pero dedicado al nuevo modelo, se seguirá su misma metodología, el diagrama se muestra en la Figura 3.2.

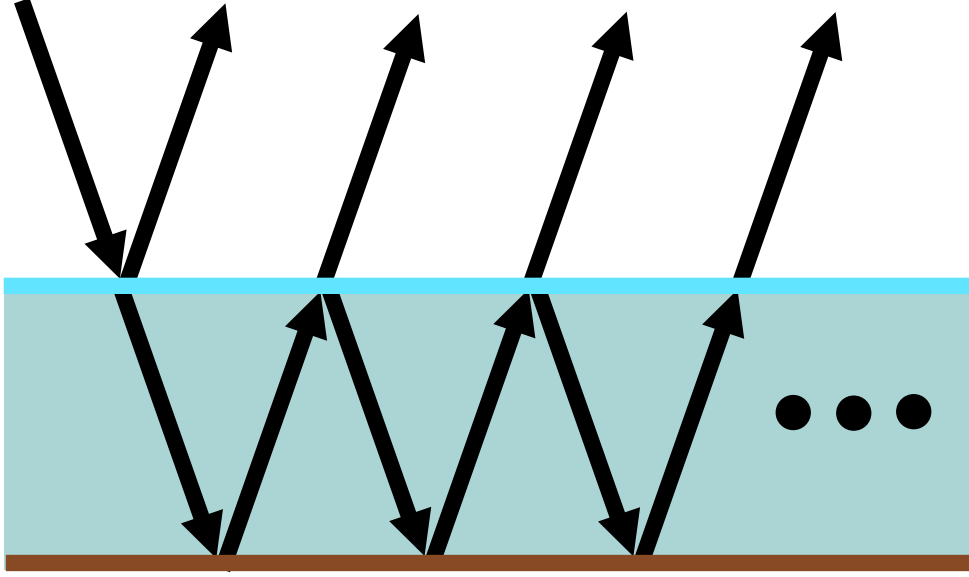


Figura 3.2: Interacción interna entre ambas superficies (difusa con dieléctrica), modelada de forma idónea.

Para la composición del material propuesto, únicamente se tendría reflexión total saliente del material, dado que las superficies difusas no exhiben transmisión. Por tanto, la fórmula simplificada para la energía total reflejada se vería de la siguiente forma:

$$R_{\text{total}} = R_s + \frac{T_s^2 R_d}{1 - R_s R_d} \quad (3.14)$$

Donde R_s y T_s corresponde a la energía reflejada y transmitida en la superficie superior (dieléctrica), y R_d es la energía reflejada de la superficie inferior (difusa).

Ahora bien, aún existe una pequeña problemática y es que esta propuesta es válida únicamente si la dirección de la reflexión difusa es la misma que la reflexión especular $\vec{\omega}_d = \vec{\omega}_s$. Esto no sucede siempre, debido a que la naturaleza de un material difuso hace que la luz incidente se refleje uniformemente sobre todo el hemisferio. Por lo que el diagrama real puede observarse en la Figura 3.3

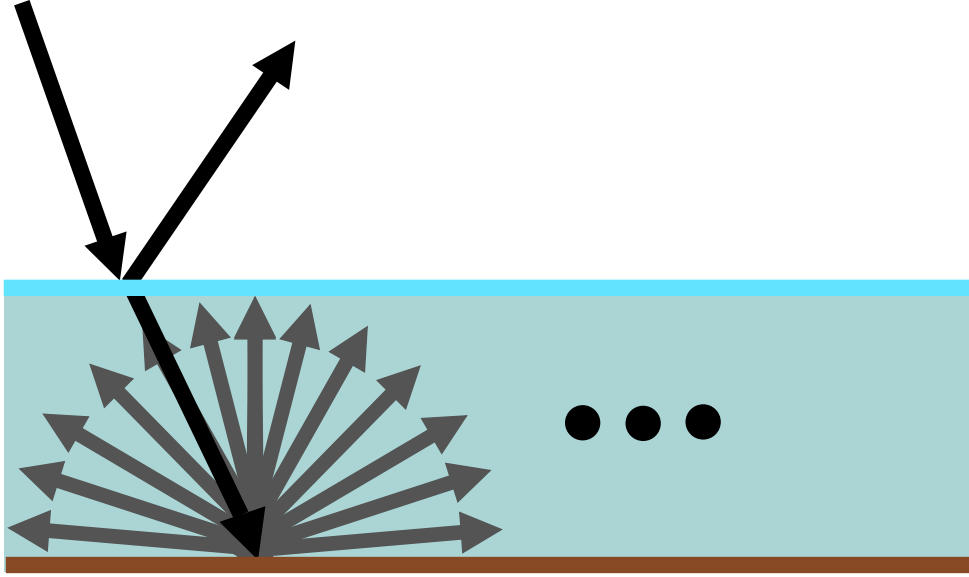


Figura 3.3: Interacción en la superficie interior, tomando en cuenta la naturaleza de una superficie difusa, solo se muestra la primer reflexión para mayor comprensión.

Es necesario calcular la reflexión difusa R_d para respetar el fenómeno del material. Una metodología útil es la del modelo de Plástico Áspero [Jakob 2010], por que ambos tienen la misma composición, una superficie difusa cubierta de una superficie dieléctrica, donde hace el cálculo de la reflexión y transmisión de manera más realista, utilizando el modelo Microfacet [Walter et al. 2007]. No obstante, ellos no toman en cuenta el cambio de fase, pero el modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003] sí lo hace.

El modelo propuesto parte utilizando el modelo de Granier y Heidrich [2003], pero con los cálculos de energía reflejada y transmitida del modelo de Plástico Áspero [Jakob 2010]. De igual manera para el muestreo y probabilidad de direcciones ($\vec{\omega}_s$ y $\vec{\omega}_d$) se utilizará el proporcionado por el modelo de Plástico Áspero [Jakob 2010].

3.2.2. Evaluación del material

Algunas consideraciones antes de empezar es que el modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003] utiliza el espectro de luz en 3 canales RGB para el cálculo en la superficie dieléctrica y añade el cambio de fase, mientras que en el modelo de plástico áspero [Jakob 2010] los índices de refracción η_t y η_i tienen un único valor. Pero si se varían el cálculo cambia, desde las direcciones transmitidas como la evaluación de la superficie dieléctrica

f_t , por lo que será necesario evaluar el modelo de plástico áspero para cada uno de los canales RGB de forma independiente.

También cabe señalar que el cálculo de la transmisión se hará con una tabla de datos precomputados, para obtener de manera más rápida el resultado, dado que el costo computacional de una polarización cúbica es menor a evaluar la transmisión del modelo Microfacet [Walter et al. 2007] para cada dirección posible, por lo que se toma la decisión de disminuir un poco la precisión a cambio de tener un tiempo de ejecución menor.

El cálculo propuesto para la energía reflejada se puede apreciar en la Ecuación 3.15.

$$f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) = w_s \frac{F(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_h) G(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_h, \vec{n}_0) D(\vec{\omega}_h, \vec{n}_0)}{4|\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}_0||\vec{\omega}_o \cdot \vec{n}_0|} \quad (3.15)$$

Como se puede observar al ser la reflexión unicamente en la superficie superior (dieléctrica), la Ecuación 3.15 es igual a la Ecuación 2.6 solo que ponderada con un peso w_s .

La formula utilizada para la energía transmitida es la misma que Plástico Áspero [Jakob 2010], mencionada anteriormente en la Ecuación 2.55.

$$f_t(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) = w_d \frac{T_{12}(\vec{\omega}_i, \vec{n}_0) T_{21}(\vec{\omega}_o, \vec{n}_0) (\vec{\omega}_o \cdot \vec{n}_0)}{(1 - R_d)\pi \eta_t^2} \quad (3.16)$$

Donde T_{12} corresponde a la transmisión desde $\vec{\omega}_i$, mientras que T_{21} es la energía que salió del material con dirección $\vec{\omega}_o$ y por último R_d es la reflexión total en la superficie difusa. Estos valores se calculan de la misma manera que en el modelo de Plástico Áspero [Jakob 2010], mediante la interpolación cúbica de la tabla de datos precomputados T y T_d , utilizando los siguientes índices dependiendo de la interacción, como se puede apreciar en las ecuaciones 3.17, 3.18 y 3.19.

$$T_{12}(\vec{\omega}_i, \vec{n}_0) = T\left(\frac{\eta_t[\lambda]}{\eta_i[\lambda]}, \alpha, \cos \theta_i\right) \quad (3.17)$$

$$T_{21}(\vec{\omega}_o, \vec{n}_0) = T\left(\frac{\eta_t[\lambda]}{\eta_i[\lambda]}, \alpha, \cos \theta_o\right) \quad (3.18)$$

$$R_d = 1 - T_d\left(\frac{\eta_i[\lambda]}{\eta_t[\lambda]}, \alpha\right) \quad (3.19)$$

Donde el índice de refracción η_t y el valor de aspereza α dependerán de la naturaleza de la superficie dieléctrica.

El cálculo es el mismo que el modelo de Plástico Áspero [Jakob 2010], con la diferencia que en esta ocasión en lugar de tener el mismo valor para cada canal RGB, será necesario hacer el cálculo para cada uno de los canales, con sus respectivos índices de refracción $\frac{\eta_t}{\eta_i}$ y longitud de onda λ , obteniendo de esta manera valores diferentes.

El cálculo de la energía que mutó (cambio de fase), es igual a la propuesta por Granier y Heidrich [2003] en la Ecuación 2.28 y 2.29.

$$\Phi(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) = \pi \frac{\eta_t[\lambda] d}{\lambda} ([\vec{\omega}_{ti} + \vec{\omega}_{to}] \cdot -\vec{n}_0) \quad (3.20)$$

$$f_\Phi(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) = 2 \cos(2\Phi(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0)) \sqrt{f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) f_t(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0)} \quad (3.21)$$

Con la diferencia que en esta ocasión se utilizarán las funciones f_r y f_t definidas en base del modelo de Plástico Áspero [Jakob 2010].

Finalmente, el valor de f_s es igual al modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003], definida en la Ecuación 2.30, la suma de las tres energías; reflexión, transmisión y cambio de fase.

$$f_s = f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) + f_t(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) + f_\Phi(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) \quad (3.22)$$

3.2.3. Muestreo y probabilidad

Para el caso del muestreo y la probabilidad, también se debe utilizar una metodología que cuente con ambas partes, tanto para la superficie difusa como para la superficie dieléctrica, por lo que se utilizará la misma que el modelo de Plástico Áspero [Jakob 2010].

Para el caso de la dirección dieléctrica $\vec{\omega}_s$ se hace mediante la distribución Microfacet [Walter et al. 2007], primero se calcula la dirección media con las ecuaciones 3.23 y 3.24.

$$\phi_h = 2\pi\xi_2, \quad \theta_h = \arctan \sqrt{-\alpha^2 \log(1 - \xi_1)} \quad (3.23)$$

$$\vec{\omega}_h = \begin{bmatrix} \sin \theta_h \cos \phi_h \\ \sin \theta_h \sin \phi_h \\ \cos \theta_h \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

A partir de esta dirección ya es posible calcular la dirección especular, su forma de hacerlo está definida en la Ecuación 3.25.

$$\vec{\omega}_s = -\vec{\omega}_i + 2(\vec{\omega}_i \cdot \vec{\omega}_h) \vec{\omega}_h \quad (3.25)$$

Esta dirección tiene una probabilidad p definida en la Ecuación 3.26.

$$p(\omega_o) = \frac{|\vec{\omega}_i \cdot \vec{\omega}_h| G(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_h, \vec{n}_0)}{|\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}_0| |\vec{\omega}_h \vec{n}_0|} \quad (3.26)$$

El cálculo para la dirección difusa es igual a la utilizada para el modelo de Granier y Heidrich [2003], definida en el muestreo implementado en Mitsuba [Jakob 2010] para superficies difusas, este cálculo se puede apreciar en la Ecuación 3.27.

$$\vec{\omega}_d = \begin{bmatrix} r \cos \phi \\ r \sin \phi \\ \sqrt{1 - (r \cos \phi)^2 - (\sin \phi)^2} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Donde r y ϕ se calculan mediante las ecuaciones 3.8 y 3.9, ya definidas anteriormente. La probabilidad de esta dirección está dado por la Ecuación 3.28.

$$p_d(\vec{\omega}_o) = \frac{1}{\pi} \cdot (\vec{\omega}_o \cdot \vec{n}_1) \quad (3.28)$$

La metodología para saber cual dirección tomar, puede ser la misma que se aplicó anteriormente, dependiendo de la energía reflejada, definido en la ecuación 3.29.

$$\vec{\omega}_o = \begin{cases} \vec{\omega}_s & \text{si } \xi \leq f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) \\ \vec{\omega}_d & \text{si } \xi > f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o, \vec{n}_0) \end{cases} \quad (3.29)$$

Para el caso de la probabilidad se suman ambas, la dieléctrica y la difusa, su cálculo está

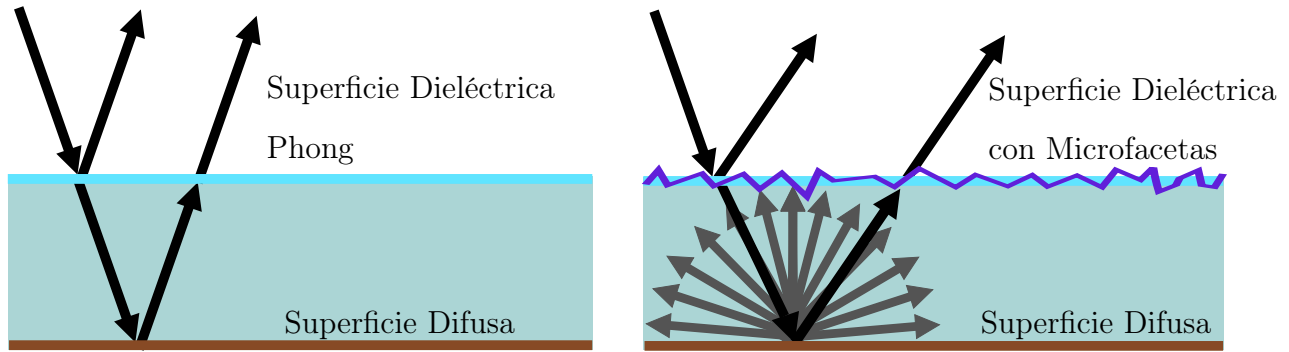
definido en la Ecuación 3.30.

$$p = p_s(\vec{\omega}_o) + p_d(\vec{\omega}_o) \quad (3.30)$$

De esta manera, las ecuaciones del modelo propuesto estarían completas con su respectiva evaluación, muestreo y probabilidad.

El modelo propuesto se construye a partir de la formulación del modelo Granier [Granier y Heidrich 2003], por que considera energía reflejada R , energía transmitida T y cambio de fase Φ . Posteriormente se remplaza la superficie dieléctrica original, por una basada en física [Walter et al. 2007] y se toma el cálculo de la energía reflejada y transmitida del modelo de Plástico Áspero [Jakob 2010], por que tiene la misma composición, una superficie difusa cubierta por una superficie dieléctrica, pero ahora la superficie dieléctrica es basada en microfacetas.

Una ejemplificación de este remplazo de la superficie dieléctrica se puede apreciar en la Figura 3.4, por que muestra un diagrama simplificado del material.



(a) Diagrama del modelo base propuesto por Granier y Heidrich [2003]

(b) Diagrama del modelo propuesto

Figura 3.4: Comparación del modelo base y modelo propuesto, donde se puede observar el cambio que se realizó en la superficie dieléctrica, donde ahora se cuenta con una superficie dieléctrica basada en microfacetas.

Una forma de ver como el modelo debería calcularse es mediante un diagrama de flujo, este se simplificó para su fácil comprensión y se puede observar en la Figura 3.4.

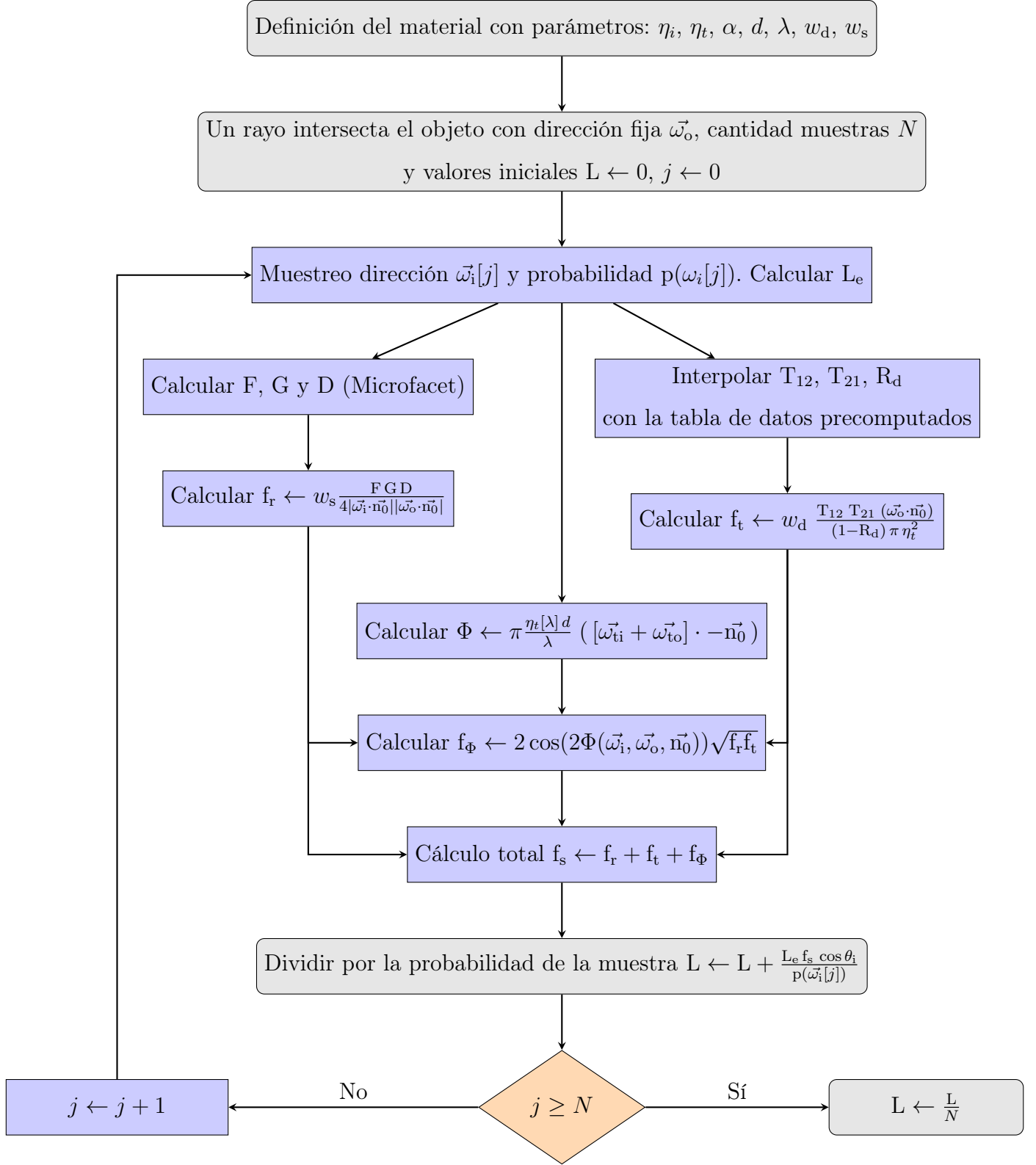


Figura 3.5: Diagrama de flujo simplificado del modelo propuesto con estimador Monte Carlo [Shirley, Wang y Zimmerman 1996] en iluminación directa con enfoque en el cálculo BSDF del material propuesto.

3.3. Conclusiones

Una vez implementado el modelo de Granier [Granier y Heidrich 2003], se obtuvo una base sólida de la cual partir y hacer comparaciones. Posteriormente, se propuso un nuevo modelo que parte del modelo base, pero utiliza el cálculo de las reflexiones internas de Plástico Áspero [Jakob 2010], de una superficie difusa con otra dieléctrica compuesta por microfacetas [Walter et al. 2007]. Una vez definidas las ecuaciones de la evaluación, el muestreo y la probabilidad, se programó el código en Mitsuba [Jakob 2010], cuyos resultados se verán en el siguiente capítulo.

Capítulo 4

Resultados

Se hicieron diversas pruebas con el modelo propuesto para ver su capacidad de producir iridiscencia, así como sus limitaciones y alcance. Dado que esta es una mejora al modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003], es útil hacer una comparación tanto visual como en tiempos de ejecución, para ver si existe alguna mejora.

Las especificaciones de la computadora con la que se realizaron los experimentos se pueden apreciar en la Tabla 4.1.

Sistema Operativo	Ubuntu 20.04.6 LTS (64 bits)
Procesador	AMD Ryzen 5 2600 Six-Core Processor
Núcleos	6
Hilos	12
Frecuencia del CPU	3.4 GHz
Memoria RAM	8 GiB

Tabla 4.1: Especificaciones de la computadora utilizada para realizar las imágenes renderizadas.

El motor de renderizado Mitsuba [Jakob 2010] utiliza todos los hilos a su disposición para realizar el cálculo de cada pixel de forma separada, para optimizar los recursos de la computadora.

4.1. Resultados Obtenidos

Se renderizó una escena con iluminación global, los valores utilizados de los parámetros son los mencionados en la Tabla 4.2.

parámetro	valor
$\vec{n}_0$	[0.0, 0.0, 1.0]
$\vec{n}_1$	[0.0, 0.0, 1.0]
η_i	[1.0, 1.0, 1.0]
η_t	[1.8, 1.7, 1.6]
d	1000
λ	[645.0, 525.0, 445.0]
α	0.08
w_s	0.6
w_d	0.4
$spp (N)$	1024

Tabla 4.2: Parámetros utilizados en la primer imagen renderizada del modelo propuesto.

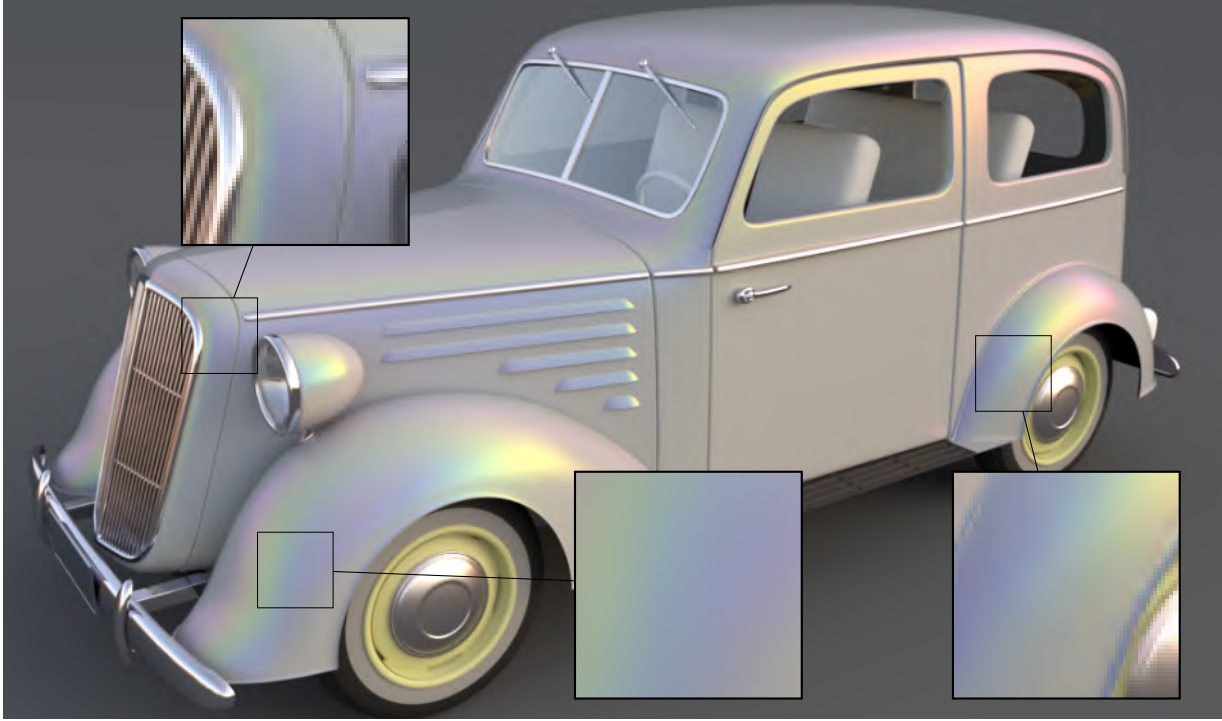


Figura 4.1: Primer imagen renderizada de una escena con el modelo propuesto; un vehículo con una pintura gris mate cubierto de una superficie semitransparente que presenta iridiscencia. Escena proporcionada por Bitterli [2016].

En la Figura 4.1 se puede observar como el modelo presenta brillo en toda la superficie del dragón, así como tonalidades verdes y azules en algunas partes.

Si se varía el índice de refracción η_t de la superficie dieléctrica así como la distancia entre superficies d , dejando los demás parámetros constantes ($\alpha = 0.1$, $w_s = 0.5$, $w_d = 0.5$ y $\lambda = [645, 525, 445]$), se pueden obtener diferentes efectos de iridiscencia, como se puede apreciar en la Figura 4.2.

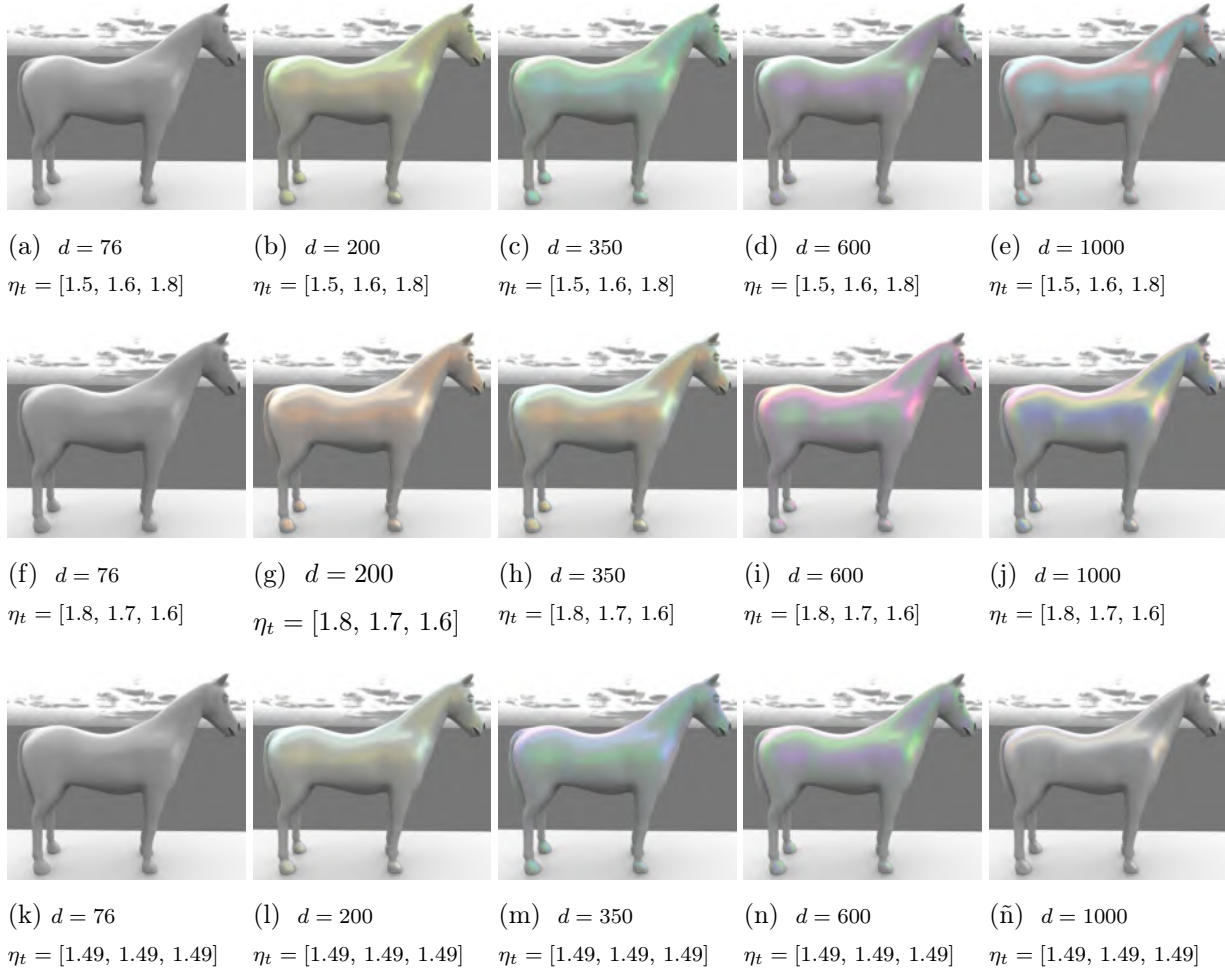


Figura 4.2: Efectos de iridiscencia obtenidos al variar los parámetros de índice de refracción η_t y la distancia d entre superficies, mientras que el valor de longitud de onda se mantiene constante $\lambda = [645, 525, 445]$ en cada canal RGB. Escena proporcionada por Bitterli [2016].

Otra forma de variar la iridiscencia es mediante los valores de longitud de onda, respetando que la muestra sea tomada en el rango de su canal RGB correcto, se realizaron pruebas utilizando $\lambda = [680, 520, 400]$, estas pueden apreciarse en la Figura 4.3.

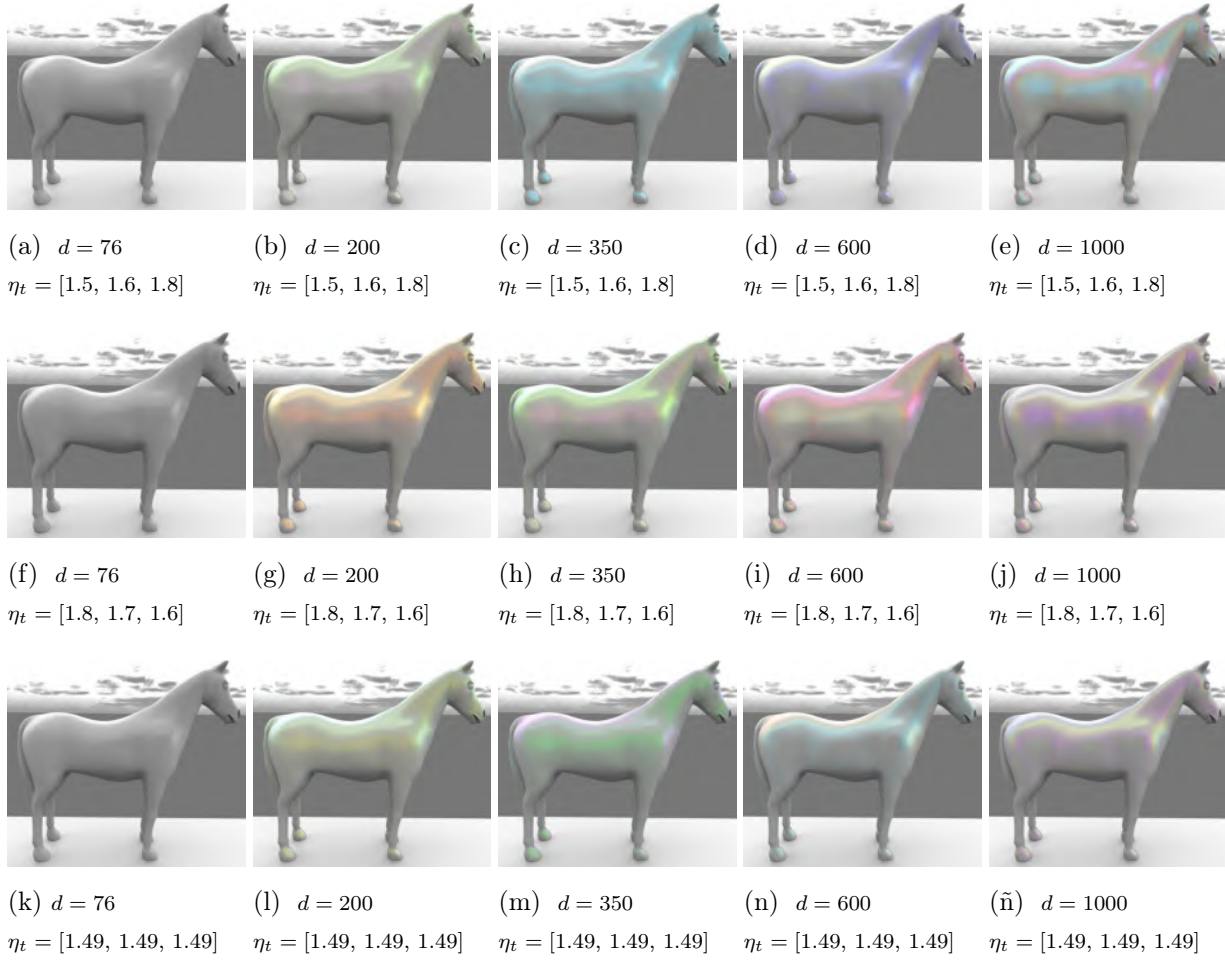


Figura 4.3: Otra forma de obtener diferentes tipos de iridiscencia, es variando el valor de la longitud de onda en su respectivo canal (respetando su rango), $\lambda = [680, 520, 400]$. Escena proporcionada por Bitterli [2016]

Como se puede observar en la Figura 4.3, con tan solo modificar la longitud de onda en cada canal λ , el modelo es capaz de obtener diferentes tipos de iridiscencia, esto se debe a la división realizada en el cambio de fase $\frac{d}{\lambda}$, pero se debe tener cuidado con variar la longitud de onda λ de cada canal, dado que deben quedar dentro del rango del espectro visible para cada color, de no ser así se obtendrían resultados físicamente incorrectos.

Ahora bien si se deja el índice de refracción η_t y la longitud de onda constante λ , pero si se modifica el valor de aspereza α y la distancia d del modelo propuesto, se puede obtener otro tipo de interacción.



Figura 4.4: Otra variación de la superficie dieléctrica, donde ahora se modifica la aspereza del material α . Se puede apreciar que entre más alto, más difuso y notorio se vuelve el efecto, mientras que entre más bajo más especular y menos visible es. Escena proporcionada por Bitterli [2016].

Como se puede ver en la Figura 4.4 conforme se varía la distancia d entre superficies se obtiene un color distinto, esto se debe a la porción de la onda que logra pasar, cuando la distancia es pequeña se pueden observar tonos más rojizos, conforme aumenta se ven tonos más verdosos hasta que se logran observar tonos más azules y esto depende de que tan cerca está el espectro de alguno de los canales.

Mientras que la aspereza del material α muestra como con valores pequeños la iridiscencia es casi imperceptible dado que casi no existen perturbaciones y la superficie se comporta más como una especular. No obstante, al aumentar se puede observar como el efecto iridiscente se hace más notable, acercándose a un material difuso de un solo color.

4.2. Análisis de resultados

Para realizar un análisis, se realiza una comparación con el modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003], donde se realizaron renderizados en el mismo entorno, con las mismas fuentes luminosas, bajo las mismas condiciones. Los parámetros en común están proporcionados en la Tabla 4.3.

parámetro	valor
$\vec{n}_0$	[0.1736, 0.0 ,0.9848] (Desviación de 10°)
$\vec{n}_1$	[0.0, 0.0, 1.0]
η_i	[1.0, 1.0, 1.0]
η_t	[1.5, 1.6, 1.8]
d	76
λ	[645.0, 525.0, 445.0]
spp	1024

Tabla 4.3: Parámetros para comparativa de modelos

Cabe señalar que ambos modelos cuentan con su respectivo parámetro que define la aspereza del material, por lo que se realizó una aproximación propuesta por Jakob [2010], definida en la ecuación 4.1.

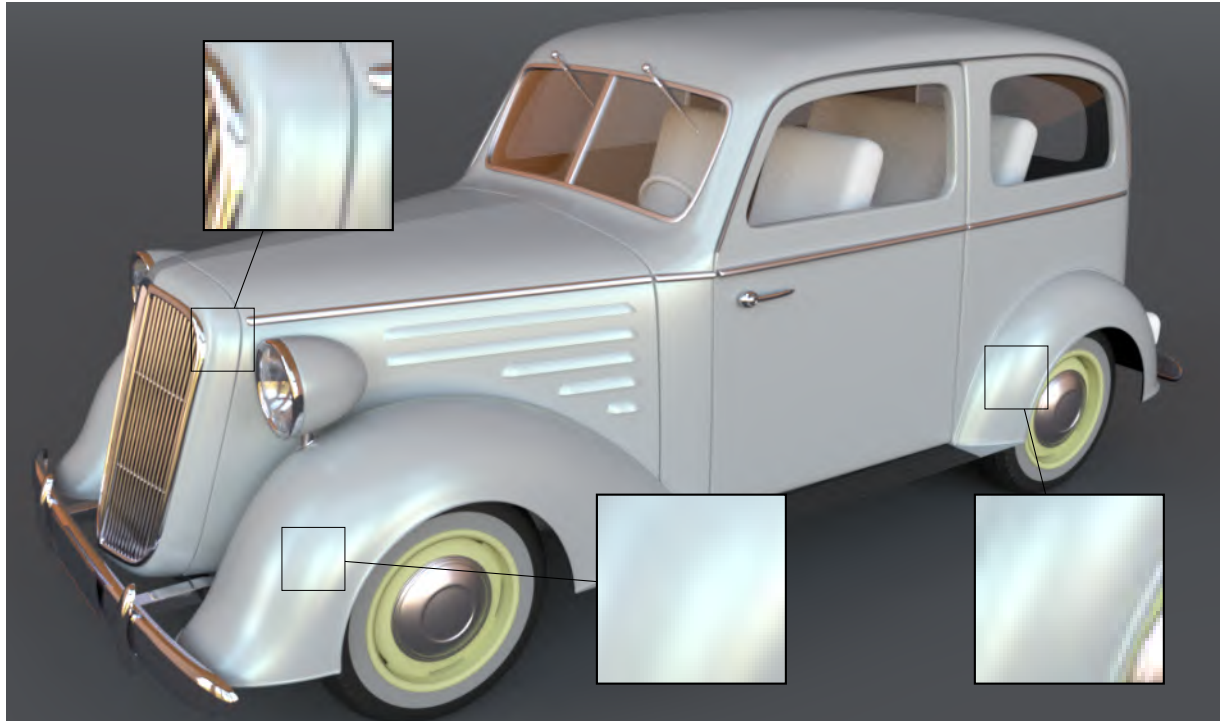
$$\alpha \approx \sqrt{\frac{2}{e_n}}, \quad e_n \approx \frac{2}{\alpha^2} \quad (4.1)$$

Utilizando la ecuación 4.1, el valor de los índices de aspereza aproximados se muestran en la Tabla 4.4

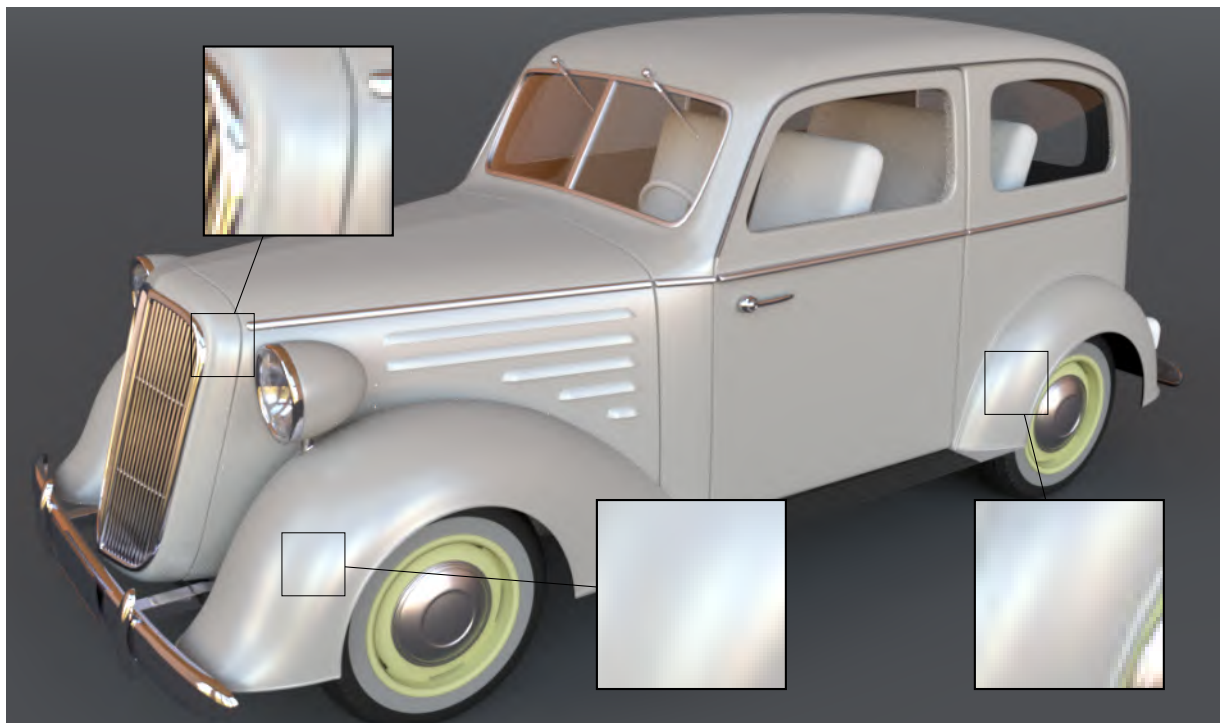
parámetro	valor
e_0	130
e_1	130
α	0.124

Tabla 4.4: Índices de aspereza

La comparativa de ambos modelos se puede apreciar en la Figura 4.5.



(a) Modelo Propuesto



(b) Modelo de Granier [Granier y Heidrich 2003]

Figura 4.5: Comparativa entre el modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003] y el modelo modificado, únicamente con un mapa ambiental en escala de grises, donde se puede apreciar cómo ambos modelos presentan iridiscencia, pero presentan diferentes colores de iridiscencia. Escena proporcionada por Bitterli [2016].

En la Figura 4.5 se puede observar como la iridiscencia no solo prevalece sino que es más notoria en comparación, la iridiscencia también sufre un cambio de color, por que la energía reflejada y transmitida se calcula de diferente manera.

Esta podría no tratarse de una comparación justa por varias razones, la primordial es que son modelos diferentes. La energía reflejada R y transmitida T se calcula de manera diferente y dado que la variabilidad del modelo propuesto es más extensa, esto impacta considerablemente. El modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003] tiene una variación de color fija, donde al aumentar la distancia entre superficies d varía el color del material únicamente, y es indispensable utilizar desviación de la normal en la primer superficie si se desea obtener iridiscencia.

Para determinar que modelo es mejor, depende del criterio a evaluar, pero hay algo que no se puede discutir y es que el modelo propuesto presenta una mayor intensidad y variabilidad en la iridiscencia e incluso en los lugares donde solo se presenta reflexión del material dieléctrico se puede apreciar mayor realismo, gracias a utilizar una superficie basada en microfacetas [Walter et al. 2007].

También cabe señalar que en el modelo propuesto, al variar la distancia entre superficies d , se obtienen diferentes tipos de iridiscencia, sin modificar el color base del objeto. Mientras que en el modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003], al modificar la distancia d , el color base del objeto también cambia, un ejemplo de éste efecto puede observarse en la Figura 1.9 (extraída del artículo original).

4.2.1. Tiempo de ejecución

Si se hace una comparación a fondo, considerando el tiempo de ejecución, se tienen los resultados presentados en la Tabla 4.5.

Iluminación	Muestras por pixel	Modelo de Granier	Modelo Propuesto	Diferencia
Directa	16	15.0060s	15.4070s	2.67 %
	64	57.8670s	1.0418m	8.02 %
	128	1.8607m	1.9958m	7.26 %
	256	3.6975m	4.0343m	9.11 %
	512	7.8797m	8.5435m	8.42 %
	1024	16.2295m	16.8424m	3.78 %
Global	16	49.5910s	52.5480s	5.96 %
	64	3.4588m	3.5858m	3.67 %
	128	6.8734m	7.1804m	4.47 %
	256	13.8990m	14.3768m	3.44 %
	512	27.6074m	30.0452m	8.83 %
	1024	58.0813m	65.0536m	12.01 %

Tabla 4.5: Comparación en tiempos de ejecución entre el modelo de Granier y Heidrich [2003] y el propuesto.

Se puede observar como el tiempo de ejecución del modelo base [Granier y Heidrich 2003] es más bajo, a pesar de esto el modelo propuesto no mantiene un tiempo excesivo en comparación. Cabe señalar que el tiempo de ejecución puede variar, por los procesos en segundo plano que haga el sistema operativo, pero estos resultados se hicieron cerrando todos los demás procesos posibles.

El cálculo del modelo propuesto por Granier y Heidrich [2003] no tiene anidamiento o recursión por lo que su cálculo tiene menor tiempo de ejecución, pero si se desea utilizar un material físicamente correcto y obtener el valor por medio de fuerza bruta o evaluación rigurosa tendría un tiempo mucho más elevado, pero gracias a la interpolación hecha con la tabla de datos precomputados, se obtienen tiempos de ejecución aceptables. Es importante mencionar que el modelo propuesto tiene efectos iridiscentes más intensos y versátiles, por

lo que vale la pena el costo extra a cambio de las ventajas que ofrece.

4.2.2. Diferencias y Observaciones

La iridiscencia sucede gracias a la interacción de ambas superficies y los parámetros que tienen un mayor impacto son las siguientes:

- **Índice de refracción del material** (η_t): Indica como cambia la luz al entrar a un medio, el cual depende de la superficie dieléctrica y varía en los canales RGB. Entre mayor sea la diferencia entre los índices de cada canal, más rango abarcará la variación de color resultante.
- **Longitud de Onda** (λ): Varía dependiendo del canal RGB, se le puede asignar un valor dentro del espectro visible de dicho canal, donde dependiendo del valor asignado la iridiscencia tendrá diferentes tipos de tonalidades.
- **Distancia entre superficies** (d): Este valor indicará qué porción de la longitud de onda (λ) logra atravesar el material. Si el valor es más pequeño que la onda ésta no alcanzará a pasar por completo (menor a un ciclo), si es igual pasará por completo (un ciclo), pero si es mayor podrá pasar más de una ocasión (mayor a un ciclo).
- **Índice de Aspereza** (α): Es el responsable del brillo y área que ocupa la iridiscencia, si es pequeño quiere decir que el material es especular y contará con poca iridiscencia, pero entre más grande más difusa será la superficie dieléctrica disminuyendo el brillo del objeto pero aumentando el área en el que se ve la iridiscencia.

La normal en la primer superficie $\vec{n}_0$, las direcciones $\vec{\omega}_{ti}$ y $\vec{\omega}_{to}$, impactan de manera directa por que el término $(\vec{\omega}_{ti} + \vec{\omega}_{to}) \cdot (-\vec{n}_0)$ verifica qué tan intensa debería ser la iridiscencia, como se tiene un producto punto entre la normal en el hemisferio opuesto y la suma de un vector, lo cual es la dirección total entre $\vec{\omega}_{ti}$ y $\vec{\omega}_{to}$. Si la diferencia entre dicha normal y dicho vector es grande el resultado será cercano a cero lo que quiere decir que la iridiscencia no es mucha, pero en el caso contrario entre más cerca está, mayor peso tendrá la iridiscencia, es una forma de ver que dirección tomó el cambio de fase hipotéticamente.

La energías f_r y f_t no solo son importantes para darle el aspecto al objeto igual a un material real, estas también pueden llegar a impactar de forma directa a la iridiscencia pero únicamente la intensidad de la misma, El término $\sqrt{f_r f_t}$, multiplicado en el cambio de fase, ayuda a obtener la energía media del modelo, por que si el modelo no tiene energía, por propiedades del material o de la luz como la falta de iluminación, la reflexión o transmisión, quiere decir que no debería apreciarse iridiscencia por si misma.

Otros valores con los que se puede analizar el modelo son la distribución utilizada con su respectivo índice de aspereza α . Esto afecta más la parte de la energía reflejada y transmitida ($\sqrt{f_r f_t}$). Éstos indican que tan probable es que las microfacetas estén alineadas en la superficie superior, entre más alto el índice de refracción más transparente se vuelve (refleja toda la energía), entre menor sea más difuso (absorbe energía).

Mientras se realizaron los experimentos, se observó en ciertas escenas con iluminación y objetos diferentes, que las regiones donde sucede la máxima concentración de luz, donde idealmente debería presentar un resultado en su mayoría blanco, mostraba una mayor presencia de iridiscencia.

Este comportamiento del modelo no parece deberse a un error de implementación, dado que se validó el modelo propuesto con el modelo Plástico Áspero [Jakob 2010], la comparación consistió en asignar los mismo parámetros en ambos modelos, en el modelo propuesto despreciar el cambio de fase y asignar el índice de refracción igual en cada canal, el resultado obtenido fue el mismo en ambos modelos. Además las fórmulas utilizadas para el cambio de fase concuerdan con las propuestas por Granier y Heidrich [2003] en su artículo, lo que sugiere que el fenómeno surge por la naturaleza del modelo.

4.3. Conclusiones

Después de observar varias imágenes renderizadas del modelo propuesto, se puede apreciar que, al modificar los parámetros, se obtienen diferentes efectos de iridiscencia, lo cual proporciona versatilidad. Comparado contra el modelo previo, la nueva propuesta exhibe un efecto iridiscente más intenso con un comportamiento de la luz más realista. A pesar de que las especificaciones de la computadora en la que se realizaron las pruebas es de uso

doméstico, se logró un tiempo de ejecución bajo, por lo que un servidor dedicado podría realizar el proceso mucho más rápido.

Capítulo 5

Conclusiones

El modelo previo propuesto por [Granier y Heidrich 2003] presenta iridiscencia utilizando el cambio de fase [Born y Wolf 1999], el cálculo de la energía reflejada y transmitida [Phong 1975]. Dado que ya existen modelos más realistas capaces de calcular la energía reflejada y transmitida en una superficie semitransparente, se decide utilizar un material basado en microfacetas [Walter et al. 2007]. Pero no basta con sólo reemplazarlo, ya que se debe respetar la interacción de la luz a través de la superficie. La metodología que se utiliza para resolver esta cuestión fue del modelo de Plástico Áspero [Jakob 2010], porque presenta la misma configuración del material, una superficie difusa cubierta de una superficie dieléctrica. Se hicieron los ajustes necesarios para que el modelo incluya tanto el cambio de fase como el cálculo de la energía reflejada y transmitida en los tres canales RGB.

Los experimentos obtenidos permiten observar una mejoría con respecto al modelo original, dado que la iridiscencia producida tiene una variación más notoria e intensa. El modelo propuesto es flexible, capaz de replicar diversos materiales, dado que presenta diferentes tipos de iridiscencia, al modificar únicamente los parámetros de entrada.

Para obtener iridiscencia la luz debe tratarse como si fuera una onda, idealmente con valores continuos, pero a pesar de que únicamente se toma en cuenta tres canales de forma escalar, se puede observar como la iridiscencia está presente.

La energía reflejada en la superficie difusa inferior se calcula mediante la conservación de la energía, donde la energía que logró salir del material y la energía reflejada en la

superficie inferior deben sumar uno. Dado que es más sencillo calcular la energía transmitida desde dentro del material hacia fuera con el modelo basado en microfacetas [Walter et al. 2007], se decide ir por este camino. El cálculo se realiza con una tabla de datos previa, para que al momento de renderizar, únicamente sea necesario hacer una interpolación de datos, esto con el objetivo de reducir el tiempo de ejecución.

Una limitación que tiene el modelo propuesto es con el cambio de fase, se debe a que solo se aplica en la interacción total, bajo la forma $f_s = f_r + f_t + f_\phi$. Pero de manera realista, cada reflexión interna tiene su propio cambio de fase. El modelo propuesto sí toma en cuenta las reflexiones internas de cada canal, con su respectivo índice de refracción, pero no toma en cuenta la interferencia obtenida en cada interacción, dado que el tiempo de ejecución se elevaría.

Se obtuvo un nuevo modelo a partir del existente, capaz de recrear la iridiscencia utilizando una superficie semitransparente basada en física, lo que le proporciona un mayor realismo. Este modelo tiene mucha flexibilidad ya que puede ser capaz de simular varios objetos, siempre y cuando se tengan los parámetros de entradas necesarias para simularlo.

5.1. Trabajo a futuro

Existen diversas formas para mejorar el modelo propuesto, se puede realizar una tabla de datos precomputada más grande para almacenar diferencias más pequeñas de rugosidad, índices de refracción y direcciones para obtener mayor precisión. También es posible reemplazar el método de interpolación por uno más preciso o que se adecúe a los datos, incluso se puede utilizar un algoritmo de aprendizaje automatizado capaz de predecir la transmisión con los valores de entrada proporcionados, se podría añadir el cambio de fase de cada reflexión interna, para mejorar aún más el modelo, a pesar de elevar el tiempo de ejecución.

El modelo separa su cálculo respetando el camino de la luz, por lo que podría utilizarse para una parametrización distinta, utilizando superficies de diferentes materiales, o incluso podría generalizarse para que únicamente se tome en cuenta el cálculo de la superficie dieléctrica (despreciando el de la superficie difusa), para su uso compatible en

modelos multi-capas ya existentes.

También podría adecuarse para tomar la luz con más canales, no solo con los tres más importantes (RGB). Puede también realizarse una investigación adicional para hacer una comparativa entre otros modelos de iridiscencia, calcular qué valores de entrada pueden igualar o acercarse al resultado propuesto por otros modelos específicos.

Bibliografía

- Beckmann, P. y A. Spizzichino [1963]. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*. [Distributed in the Western Hemisphere by Macmillan, New York]. Pergamon Press. URL: <https://books.google.fr/books?id=QBEIAQAAIAAJ>.
- Catmull, Edwin y Raphael Rom [1974]. «A class of local interpolating splines». En: *Computer Aided Geometric Design*. University of Utah report UTEC-CS-74-133.
- Phong, Bui Tuong [1975]. «Illumination for computer generated pictures». En: *Commun. ACM* 18.6.
- Cook, R. L. y K. E. Torrance [1982]. «A Reflectance Model for Computer Graphics». En: *ACM Transactions on Graphics* 1.1, págs. 7-24. DOI: [10.1145/357290.357293](https://doi.org/10.1145/357290.357293).
- Kajiya, James T. [1986]. «The Rendering Equation». En: *ACM SIGGRAPH*. Vol. 20, págs. 143-150.
- Schlick, Christophe [1994]. «An inexpensive BRDF model for physically-based rendering». En: *Computer graphics forum*. Vol. 13. Wiley Online Library, págs. 233-246.
- Shirley, Peter, Changyaw Wang y Kurt Zimmerman [1996]. «Monte Carlo Techniques for Direct Lighting Calculations». En: *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 15.1, págs. 1-36. DOI: [10.1145/226150.226151](https://doi.org/10.1145/226150.226151).
- Palik, Edward D. [1998]. *Handbook of Optical Constants of Solids*. Academic Press.
- Born, Max y Emil Wolf [1999]. *Principles of Optics*. 7th. Cambridge University Press.
- Sun, Yinlong et al. [2000]. «Rendering iridescent colors of optical disks». En: *Rendering Techniques 2000: Proceedings of the Eurographics Workshop in Brno, Czech Republic, June 26–28, 2000 11*. Springer, págs. 341-352.
- Granier, Xavier y Wolfgang Heidrich [2003]. «A Simple Layered RGB BRDF Model». En: *Graphical Models* 65.4, págs. 171-184. DOI: [10.1016/S1524-0703\(03\)00042-0](https://doi.org/10.1016/S1524-0703(03)00042-0).

- Sun, Yinlong [2006]. «Rendering Biological Iridescences with RGB-Based Renderers». En: *ACM Transactions on Graphics* 25.1, págs. 100-129.
- Press, William H. et al. [2007]. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. 3.^a ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Walter, Bruce et al. [2007]. «Microfacet Models for Refraction Through Rough Surfaces». En: *Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques (EGSR'07)*. Aire-la-Ville, Switzerland: Eurographics Association, págs. 195-206. DOI: [10.2312/EGWR/EGSR07/195-206](https://doi.org/10.2312/EGWR/EGSR07/195-206).
- Wikimedia Commons [2008]. *Electromagnetic Spectrum Properties*. [Dominio público, licencia CC0]. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_Spectrum_Properties_edit.svg.
- Jakob, Wenzel [2010]. *Mitsuba Renderer*. URL: <http://www.mitsuba-renderer.org>.
- Jakob, Wenzel et al. [2014]. «A Comprehensive Framework for Rendering Layered Materials». En: *ACM Transactions on Graphics* 33.4, págs. 1-14. DOI: [10.1145/2601097.2601139](https://doi.org/10.1145/2601097.2601139).
- Bitterli, Benedikt [2016]. *Rendering resources*. <https://benedikt-bitterli.me/resources/>.
- Belcour, Laurent y Pascal Barla [2017]. «A practical extension to microfacet theory for the modeling of varying iridescence». En: *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 36.4, págs. 1-14.
- Guo, Yu, Miloš Hašan y Shuang Zhao [2018]. «Position-free Monte Carlo simulation for arbitrary layered BSDFs». En: *ACM Transactions on Graphics (ToG)* 37.6, págs. 1-14.
- Yan, Ling-Qi et al. [2018]. «Rendering specular microgeometry with wave optics». En: *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 37.4, págs. 1-10.
- Padron-Griffe, Juan Raul et al. [2023]. «A Biologically-Inspired Appearance Model for Snake Skin.» En: *CEIG*, págs. 1-8.
- Pexels [2025]. *Contenido con licencia libre de derechos (equivalente a CC0)*. Recuperado el 8 de enero de 2025 de <https://www.pexels.com/es-es/license/>. URL: <https://www.pexels.com/es-es/license/>.

Pixabay [2025]. *Contenido con licencia libre de derechos (equivalente a CC0)*. Recuperado el 8 de enero de 2025 de <https://pixabay.com/service/license-summary/>. URL: <https://pixabay.com/service/license-summary/>.

Jehosafat Coria Barragán

Incorporación del modelo Microfacet para el tratamiento de efectos de iridiscencia en un material por capas.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:500876040

Fecha de entrega

19 sep 2025, 10:10 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

19 sep 2025, 10:26 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Incorporación del modelo Microfacet para el tratamiento de efectos de iridiscencia en un materi....pdf

Tamaño del archivo

76.6 MB

88 páginas

18.651 palabras

93.058 caracteres

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestro en Ciencias en Ingeniería en Eléctrica	
Título del trabajo	Incorporación del modelo Microfacet para el tratamiento de efectos de iridiscencia en un material por capas	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Jehosafat Coria Barragán	1615083x@umich.mx
Director	Luis Eduardo Gamboa Guzmán	luis.gamboa@umich.mx
Codirector		
Coordinador del programa	Norberto Garcia Barriga	norberto.garcia@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	NO	
Traducción al español	NO	
Traducción a otra lengua	NO	
Revisión y corrección de estilo	SI	Corrección de estilo de citas, tablas y figuras.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	NO	
Formateo de las referencias bibliográficas	SI	Formato y estilo de la bibliografía.
Generación de contenido multimedia	NO	
Otro	NO	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Jehosafat Coria Barragan 
Lugar y fecha	Morelia Michoacán México. 17 de Septiembre del 2025