



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
VALPARAÍSO



**Andrés Ronald Castro Cruz**

# Método para la determinación del factor de reflexión in situ de superficies

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 20 de agosto de 2018



# Método para la determinación del factor de reflexión in situ de superficies

Andrés Ronald Castro Cruz

Informe Final para optar al título de Ingeniero Eléctrico,  
aprobada por la comisión de la  
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la  
Facultad de Ingeniería de la  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
conformada por

Sr. Enrique Piraino Davidson  
Profesor Guía

Sr. Iván Kopaitic Otero  
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann  
Secretario Académico

Valparaíso, 20 de agosto de 2018

*A mis padres, hermano, primos, pareja y a los cabros.*

# Agradecimientos

A mis padres, Flora e Ismael por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, por el apoyo incondicional que me brindan cada día.

Mi familia, en especial a mi hermano Ismael, mis primos Samuel y Carolina, por estar conmigo en cada momento apoyándome.

A mis amigos, Mauricio, Pablo, Alan, Benito, Gino, Gabriel y Diego. Por los buenos y malos momentos que compartimos.

A mi pareja Cata, por la compañía y el apoyo que me brindaste en esta etapa de mi vida.

*Valparaíso, 20 de agosto de 2018*

A.R.C.C

# Resumen

Para el desarrollo de este informe, hay que tener presente que el objetivo final del proyecto es encontrar un método para determinar el factor de reflexión de superficies en interiores, con miras a usarlos como insumos en los programas de cálculo de iluminación. Este método tiene la finalidad de ser aplicado en la construcción de un instrumento capaz de medir el factor de reflexión in situ de superficies.

En primera instancia es necesario comprender cada uno de los tópicos generales que se aplican a este estudio, a partir de esto, se describen conceptos básicos utilizados en fotometría, y el estado del arte relacionado con el tema, dándole énfasis al luxómetro, esfera de integración y medidor de especularidad.

Se estudia el funcionamiento del medidor de especularidad, el uso que se le da actualmente y como este puede ayudar en el proyecto con las superficies que presentan reflexión especular.

Se define la reflexión como una propiedad que tiene las diferentes superficies que forman parte de un recinto, esta depende de tipo de superficie y se puede clasificar en cuatro tipos de reflexión (especular, difusa, extendida y mixta). En el diseño de iluminación de interiores se le da énfasis al método de las cavidades zonales, ya que este tiene una gran importancia en el factor de reflexión que tienen las superficies de un recinto o local.

Luego, se describe cómo se llevará a cabo el proyecto con el fin de resolver la problemática planteada con anterioridad, para esto se estudia el funcionamiento de la esfera de integración, con la idea de utilizarla como un instrumento que sea capaz de medir el índice de reflexión de ciertos materiales. Para esto fue necesario estudiar los diferentes métodos existentes (método de A.H. Taylor y método de C.H. Sharp y W.F Little entre otros), haciendo una comparación con el fin de escoger uno de los métodos, para luego profundizar el estudio de este y aplicarlo al instrumento del proyecto.

Se estudia la teoría de la esfera de integración, para comprender de mejor manera el funcionamiento de este instrumento y dar explicación del por qué se debe utilizar en el proyecto.

Se escoge el método de A.H. Taylor para llevar a cabo el proyecto. Se describe brevemente quien fue Taylor, la teoría del reflectómetro planteada por el ingeniero, los detalles de la construcción del reflectómetro y las conclusiones a las que llegó en su artículo publicado en el año 1920.

Se describe la importancia de la clasificación de los diferentes tipos de superficies que forman parte de un recinto, ya que el instrumento del proyecto debe de ser utilizado en superficies que presenten reflexión difusa o mixta, ya que para el caso de superficies lisas o pulidas (reflexión especular) se puede medir el factor de reflexión con el medidor de especularidad.

Finalmente, se describen los materiales a utilizar para la construcción del instrumento. Con la ayuda de AutoCAD se crea el prototipo del instrumento indicando cada una de las características y observaciones importantes que este conlleva según la metodología de Taylor, como también se describe el funcionamiento del instrumento y los pasos a seguir con el fin de obtener el factor de reflexión.

Palabras claves: reflexión, esfera de integración, luxómetro, medidor de especularidad.

# Abstract

For the development of this report, it must be borne in mind that the final objective of the project is to find a method to determine the factor of reflection of surface indoors, with a view to using them as inputs in lighting calculation programs. This method has the purpose of being applied in the construction of an instrument capable of measuring the in-situ reflection factor of surface.

In the first instance it is necessary to understand each of the general topics that apply to this study, from this, basic concepts used in photometry are described, and the state of the art related to the subject, giving emphasis to the luxometer, sphere of integration and specular meter.

The operation of the specular meter is studied, the use that is currently given to it and how it can help in the project with the surfaces that present specular reflection.

Reflection is defined as a property that has the different surface that are part of an enclosure, this depends on the type of surface and can be classified into four types of reflection (specular, diffuse, extended and mixed). In the design of interior lighting emphasis is given to the method of the zonal cavities, since this is of great importance in the reflection factor of the surfaces of an enclosure of room.

Then, it describes how the project will be carried out in order to solve the problems raised previously, for this the operation of the sphere of integration is studied, with the idea of using it as an instrument that is capable of measuring the index of reflection of certain materials. For this it was necessary to study the different existing methods (A.H. Taylor method and C.H. Sharp and W.F. Little method among other), making a comparison in order to choose one of the methods, and then deepen the study of it and apply it to the instrument of the project.

The theory of the sphere of integration is studied in order to better understand the functioning of this instrument and explain why it should be used in the project.

The method of A.H. Taylor to carry out the project. It describes briefly who was Taylor, the reflectometer theory put forward by the engineer, the details of the construction of the reflectometer and the conclusions reached in his article published in the year 1920.

The importance of classifying the different types of surfaces that are part of an enclosure is described, since the project instrument must be used on surfaces that have diffuse or mixed

reflection, since in the case of smooth or polished surfaces (specular reflection) the reflection factor can be measured with the specular meter.

Finally, the materials to be used for the construction of the instrument are described. With the help of AutoCAD, the prototype of the instrument is created, indicating each of the important characteristics and observations that this implies according to the Taylor methodology, as well as the operation of the instrument and the steps to follow in order to obtain the factor of reflection.

Key words: reflection, integration sphere, luxometer, specular meter.



# Índice general

Introducción .....	1
Objetivos generales .....	2
1 Antecedentes generales y propuesta.....	3
1.1 Conceptos basicos.....	3
1.1.1 Energía lumínica .....	3
1.1.2 Flujo luminoso .....	3
1.1.3 Intensidad luminosa.....	4
1.1.4 Luminancia.....	4
1.1.5 Iluminancia.....	5
1.1.6 Emitancia luminosa.....	5
1.2 Problemática del proyecto.....	5
1.3 Estado del arte .....	5
1.3.1 Luxómetro.....	6
1.3.2 DIALux.....	8
1.3.3 Medidor de especularidad .....	9
1.3.4 Esfera integradora.....	11
1.4 Diseño de iluminacion en interiores .....	11
1.4.1 Elección del sistema de alumbrado .....	12
1.4.2 Método de los lúmenes .....	13
1.4.3 Método del punto por punto .....	14
1.5 Método cavidad zonal .....	14
1.5.1 Procedimiento.....	16
1.5.2 Índice del local .....	17
1.5.3 Factor de utilizacion .....	18
1.5.4 Calculos.....	19
1.5.5 Emplazamiento de las luminarias.....	20
1.5.6 Comprobar resultados.....	22
1.6 Proyecto a realizar .....	22
1.7 Objetivos del proyecto .....	22
1.7.1 Objetivo general .....	22
1.7.2 Objetivo especifico.....	22

---

2 Solución y marco teórico .....	23
2.1 Reflexión de la luz .....	23
2.1.1 Reflexión especular .....	23
2.1.2 Reflexión difusa .....	24
2.1.3 Reflexión extendida .....	24
2.1.4 Reflexión mixta.....	25
2.2 Factor de reflexión .....	25
2.2.1 Factor de reflexión colores .....	26
2.2.2 Factor de reflexión materiales .....	27
2.3 Solucion propuesta.....	28
2.3.1 ¿Por qué una esfera integradora? .....	29
2.3.2 Transferencia de flujo, factor de configuracion y factores de forma. ....	29
2.3.3 Teoría esfera integradora .....	32
2.4 Métodos existentes para el calculo de factor de reflexion con esfera integradora.....	35
2.4.1 Método de A.H Taylor.....	35
2.4.2 Método de C.H. Sharp y W.F. Little .....	37
2.4.3 Método para determinar la reflectancia direccional .....	38
3 Desarrollo .....	40
3.1 Instrumento del proyecto .....	40
3.2 A.H. Taylor .....	41
3.2.1 Teoría del reflectómetro .....	41
3.2.2 Detalles de construccion .....	42
3.2.3 Conclusiones de Taylor .....	43
3.3 Clasificación según el tipo de superficie .....	44
4 Instrumento del proyecto .....	45
4.1 Materiales a utilizar .....	45
4.2 Fabricación.....	45
4.3 Funcionamiento del instrumento.....	50
Discusión y conclusiones.....	52
Bibliografía.....	55

# Introducción

El diseño de la iluminación en interiores de un edificio o viviendas es tan importante como los cálculos civiles de la obra o el diseño arquitectónico del edificio, ya que un simple lugar de trabajo o habitación del hogar puede transformarse en un lugar agradable y cómodo si se consigue el nivel de iluminación adecuada. Los parámetros que definen la calidad de la iluminación dependen de la finalidad de esta (oficinas, comedor, iglesias, salas de clases, etc.).

El método de las cavidades zonales es un procedimiento empleado en iluminación para determinar el número y el tipo de luminarias o lámparas que se necesitan para proveer un nivel medio de iluminación deseada sobre el plano de trabajo, teniendo en cuenta el flujo luminoso directo como también el flujo luminoso indirecto reflejado por las distintas superficies presentes en un local (techo, paredes, y piso). Este método es bastante sencillo de aplicar, se siguen una cierta cantidad de pasos utilizando datos como las dimensiones del local, luminaria a utilizar, el nivel de iluminancia media (según normativa chilena vigente) entre otros. Finalmente, a través de una ecuación se comprueba la validez de los resultados comparándolos con las tablas de iluminación media, en esta ecuación uno de sus elementos es el factor de utilización y esta depende del factor de reflexión de las superficies, con esto se demuestra la importancia de conocer el índice de reflexión de las diferentes superficies.

Una de las cualidades que tienen las superficies es la reflexión, estas dependen del tipo de superficie, si es lisa o irregular, se pueden clasificar en 4 tipos de reflexión, especular, difusa, extendida y mixta. Esta afecta directamente en el diseño de la iluminación en interiores, ya que cada color y material del cual está construida la habitación (paredes, techo, piso) tiene un factor de reflexión diferente. Estos datos pueden encontrarse en diferentes programas de iluminación, pero no son exactos considerando algunos factores que también influye en el factor de reflexión, como la suciedad que presenta la superficie, el desgaste que sufre esta por el tiempo o ya sea por otros factores. Desde este punto nace la inquietud del proyecto. ¿Cómo se puede determinar dicho índice o factor de reflexión?, ¿existen métodos respecto al tema?

El brillo es un aspecto de la percepción visual de los objetivos que es tan importante como el color de éste. Se define como el atributo de las superficies que hace que sean de una apariencia brillante, lustrosa o metálica. Actualmente existe el instrumento medidor de especularidad o llamado en el mercado con el nombre de brillómetro, utilizados en diferentes tipos de industrias donde es necesario el control de la calidad de sus productos como en automóviles. Este

instrumento es capaz de medir el factor de reflexión de superficies especulares, pero las superficies que presentan irregularidades (reflexión difusa y mixta) se deben medir con otro tipo de instrumento, desde este punto surge la necesidad de estudiar diferentes métodos existentes con el fin de profundizar en uno de ellos para llevar a cabo el proyecto e idealizar este instrumento.

La esfera integradora entre tantas aplicaciones y usos diferentes que se le atribuye a este instrumento, destaca las medidas de transmitancia y reflectancia de diferentes muestras. Existen diferentes métodos para determinar el factor de reflexión de una superficie, estos varían según los tipos de superficies de la muestra.

A.H. Taylor, ingeniero eléctrico, en el año 1920 publicó un artículo el cual describe el funcionamiento de un instrumento capaz de medir el factor de reflexión llamado reflectómetro, este instrumento simple fue utilizado para medir el factor de reflexión de superficies con carbonato de magnesio (ladrillos y superficies de la época). En base a este método se pretende aplicar para el proyecto. Para esto es importante conocer la teoría planteada por el ingeniero, las características de su reflectómetro y las conclusiones a las que llegó en la época.

La finalidad del proyecto es encontrar un método para poder determinar el factor de reflexión de diferentes tipos de superficies. Para esto es necesario analizar y clasificar las características de las superficies que forman parte de un recinto (paredes, techo y suelo). Una vez reconocido y clasificado el tipo de superficie (con su tipo de reflexión) se escoge el instrumento necesario para medir el factor o índice de reflexión. El método final del proyecto está enfocado en superficies irregulares que presenten reflexión difusa, mixta y extendida. Para el caso de superficies de propiedades lisas o pulidas se utiliza el medidor de especularidad.

Con la ayuda de AutoCAD se idealiza la forma del instrumento, indicando las características principales de éste, como la dimensión y material del cual estará confeccionada la esfera de integración; las dimensiones que tendrá cada uno de los 3 orificios o puertos que serán utilizadas para la muestra, el instrumento que medirá la iluminancia y la entrada de la fuente de luz (en este caso un led), como también se indica el funcionamiento del instrumento.

Con esto se espera que el factor de reflexión que medirá el instrumento pueda ser utilizado en proyectos de iluminación de interiores, o en remodelación de sistemas de iluminación ya existentes. Con los datos exactos y con la ayuda de DIALux, las simulaciones pueden ser exactas para obtener un proyecto óptimo.

## **Objetivos generales**

- Desarrollar un método para determinar los factores de reflexión de las superficies en recintos interiores

# 1 Antecedentes generales y propuesta

En el presente capítulo se describe algunos conceptos básicos relacionados con área de fotometría, que son necesarios de entender para abordar el proyecto. Luego se describe la problemática del proyecto, como también el estado del arte describiendo los avances relacionados con el tema. Finalmente se describe en que consiste el proyecto, con el objetivo general y específico de este.

## 1.1 Conceptos basicos.

### 1.1.1 Energía lumínica

En fotometría la energía lumínica es la fracción percibida de la energía transportada a través de las ondas luminosas y que se manifiesta sobre la materia de distintas maneras, una de ellas es arrancar los electrones de los metales, puede comportarse como una onda o como si fuera materia, pero lo común es que se desplace como una onda e interactúe con la materia de forma material o física. La energía lumínica es de hecho una forma de energía electromagnética.

Su fórmula es:

$$Q_v = F * t [lm * s] \quad (1-1)$$

Donde:

$Q_v$ : energía lumínica

$F$ : flujo luminoso

$t$ : periodo de tiempo en segundos

### 1.1.2 Flujo luminoso

Es la medida de la potencia luminosa percibida. Difiere del flujo radiante, la medida de la potencia total emitida, en que está ajustada para reflejar la sensibilidad del ojo humano a diferentes

longitudes de onda. Su unidad de medida en el sistema internacional de unidades es el lumen (lm) y se define a partir de la unidad básica del SI, la candela (cd) como:

$$F = I * \Omega [lm] \quad (1-2)$$

Donde:

$F$ : flujo luminoso

$I$ : intensidad luminosa

$\Omega$ : ángulo medido en estereorradianes

### 1.1.3 Intensidad luminosa

Se define como la cantidad de flujo luminoso que emite una fuente por unidad de ángulo solido (ángulo espacial que abarca un objeto visto desde un punto de vista dado, mide el tamaño aparente de este y su unidad de medida es el estereorradián cuyo símbolo es el sr.). La unidad de medida de la intensidad luminosa es la candela (Cd)

$$I = dF / d\Omega [cd] \quad (1-3)$$

Donde:

$I$ : intensidad luminosa

$F$ : cantidad de flujo luminoso

$\Omega$ : ángulo solido estereorradianes

### 1.1.4 Luminancia

Se define como la densidad angular, rectangular y superficial del flujo luminoso que incide, atraviesa o emerge de una superficie siguiendo una dirección determinada. También se puede definir como la densidad superficial de intensidad luminosa en una dirección dada.

$$L = d^2F / (dS d\Omega \cos\theta) [cd/m^2] \quad (1-4)$$

Donde:

$L$ : luminancia

$F$ : flujo luminoso

$S$ : superficie del elemento en metros cuadrados

$\Omega$ : ángulo solido estereorradianes

$\theta$ : ángulo entre la normal de la superficie y la dirección considerada

### 1.1.5 Iluminancia

La iluminancia o nivel de iluminación se define como el flujo luminoso que incide sobre una superficie. Su unidad de medida es el lux (lx)

$$E = dF / dS \text{ [lx]} \quad (1-5)$$

Donde:

$E$ : iluminancia

$F$ : flujo luminoso

$S$ : superficie en metros cuadrados

### 1.1.6 Emitancia luminosa

La emitancia luminosa ( $M$ ) o exitancia luminosa es la cantidad de flujo luminoso que emite una superficie por unidad de área.

Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$M = dF / dS \text{ [lx]} \quad (1-6)$$

Donde:

$M$ : emitancia luminosa

$F$ : flujo luminoso en lúmenes

$S$ : superficie en metro cuadrados

## 1.2 Problemática del proyecto

En el diseño de luminarias para interiores, considerar el factor de reflexión que tienen las superficies es de gran importancia, ya que actualmente las simulaciones de proyectos se basan en aproximaciones que entregan los softwares como DIALux. De aquí nace la inquietud de encontrar un método para determinar los factores de reflexión exactos de cada superficie que compone el lugar, considerando cada característica que tiene ésta, como el material, tipo de pintura, suciedad, etc. Con el fin de aplicar este método en lugares donde se desea remodelar el sistema de iluminación existente, para así conseguir una simulación cercana a la realidad.

## 1.3 Estado del arte

A continuación, se mencionan algunos instrumentos y programas utilizados en el área de fotometría con una breve descripción de estos.

### 1.3.1 Luxómetro

Es un instrumento que permite medir rápidamente y de forma muy sencilla la iluminancia o cantidad de flujo luminoso que se recibe en cada unidad de área (ecuación 1-5). La luz es captada por una célula fotovoltaica que la convierte en impulsos eléctricos, dichos impulsos son interpretados y expresados en términos de luxes, unidades de medidas de los luxómetros. Estos datos son mostrados en la pantalla del instrumento.

La falta de aplicación de estándares de iluminación puede provocar daños en la vista de las personas, que pueden ir desde vista cansada hasta quemadura de retinas. Si la iluminancia es demasiado baja hace que las personas fuercen la vista, esto puede producir vista cansada o resequedad en los ojos. Lo mismo sucede si el nivel de iluminación es demasiado, puede provocar deslumbramiento, quemadura de retinas y a largo plazo ceguera. Es por esto la principal utilización de este aparato, verificar si una habitación o sala tiene los niveles de iluminación adecuados según normativas, regulaciones de salud y seguridad [1].



Figura 1-1: Luxómetro (fuente: <https://www.tecnometrica.com.mx>)

A continuación, se presentan dos tablas con la iluminancia mínima que deben tener diferentes recintos interiores, para locales comerciales e industriales (tabla 1-1) como para educacionales y asistenciales (tabla 1-2). Estos datos se rigen por la normativa chilena vigente (Nch Elec. 4/2003)



Tabla 1-1: Iluminancias mínimas para locales comerciales e industriales (fuente: Nch Elec. 4/2003)

Tipo de local	Iluminancia [Lux]
Auditorios	300
Bancos	500
Bodegas	150
Bibliotecas publicas	400
Casinos, restoranes, cocinas	300
comedores	150
Fábricas en general	300
imprentas	500
Laboratorios	500
Laboratorio de instrumentación	700
Naves de máquinas herramientas	300
Oficinas en general	400
pasillos	50
Salas de trabajo con iluminación suplementaria en cada punto	150
Salas de dibujo profesional	500
Salas de tableros eléctricos	300
Subestaciones	300
Salas de venta	300
Talleres de servicio, reparaciones	200
Vestuarios industriales	100

Tabla 1-2: Iluminancias mínimas para locales educacionales y asistenciales (fuente: Nch Elec. 4/2003)

Tipo de recinto	Iluminancia [Lux]
Atención administrativa	300
Bibliotecas	400
Cocinas	300
Gimnasios	200
Oficinas	400
Pasillos	100
Policlínicos	300
Salas de cirugía menor	500
Salas de cirugía mayor, quirófanos	500
Salas de clases, párvulos	150
Salas de clases, educación básica	200
Salas de clases, educación media	250
Salas de clases, educación superior	300
Salas de dibujo	600
Salas de espera	150
Salas de pacientes	100
Sala de profesores	400

### 1.3.2 DIALux

DIALux es un software gratuito de DIAL que permite crear proyectos de iluminación profesionales. El software facilita la tarea de diseñar sistemas de iluminación tanto para interiores como exteriores [2]. Su funcionalidad es de forma sencilla con su simulación en forma 3D hace de este una herramienta útil al momento de proyectar. Además, DIALux permite determinar en forma paralela el consumo energético del proyecto, para el cumplimiento de las normas vigentes a nivel nacional e internacional.

### 1.3.3 Medidor de especularidad

El brillo es una propiedad óptica que indica lo bien que puede una superficie reflejar la luz en una dirección especular (como un espejo). Es uno de los parámetros más importante que se utiliza para describir el aspecto visual de un objeto.

El medidor de especularidad (figura 1-2), también llamado brillómetro es un instrumento que se utiliza para medirla reflexión especular de una superficie u objeto. La cantidad de luz que se refleja en la superficie depende del ángulo de incidencia y las propiedades de la superficie, estas se clasifican en brillo alto, medio brillo y poco brillo.

Brillo alto, son aquellas superficies lisas y altamente pulidas, estas reflejan las imágenes con claridad, donde la luz incidente es directamente reflejada sobre la superficie. Para el caso de medio brillo a poco brillo, estas reflejan la imagen con menos claridad y con una intensidad reducida [3].



Figura 1-2: Medidor de especularidad (fuente: <http://www.elcometer.com>)

Este instrumento consiste en una fuente de luz incandescente y un receptor fotosensitivo que reacciona ante la luz visible. Las mediciones del brillómetro están relacionados con la cantidad de luz reflejada a partir de un estándar de vidrio negro pulido el cual se le asigna el valor de 100 GU. La relación entre la luz incidente reflejada por la muestra, en comparación con la relación estándar antes descrito, se mide como unidades de brillo (GU). El instrumento trabaja con tres ángulos de medición (20°, 60° y 85°). Estos ángulos están relacionados con las características de la superficie [3]. En la figura 1-3 se muestran los tres ángulos de medición entre la luz incidente y la perpendicular

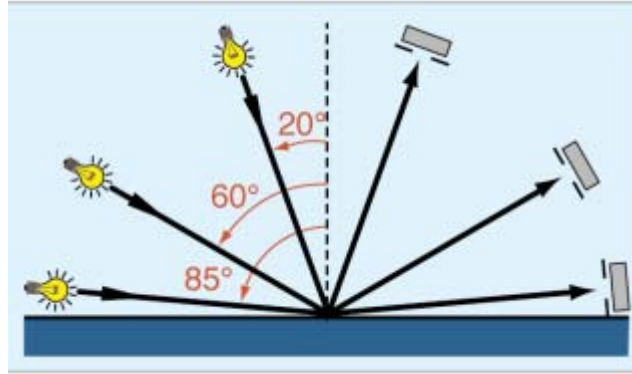


Figura 1-3: Ángulo entre la luz incidente y la perpendicular (Fuente: <http://www.byk.com>)

Los ángulos utilizados se rigen por las siguientes normas:

20° para superficies de alto brillo. Las normas utilizadas son la DIN-67530, ISO-2813, ISO 8254, ASTM-D523, ASTM 2457 cuando se desea medir especularidad en pinturas, tintas, plásticos y papel. Las normas ASTM D1834 y TAPPI-T653 se emplean para medir papeles ceresinados y papeles recubiertos.

60° se aplica para superficies con brillo medio como tintas, plásticos, cerámicas y piedras. Se basan en las normas ISO 2813, ASTM C584, ASTM D523 y ASTM D2457.

85° utilizado para materiales opacos según normas ISO 2813, DIN 67530 y ASTM D523.

En el caso de que no se pueda reconocer el tipo de superficie, o el ángulo de medición, se utiliza la tabla 1-3. El cual consiste en medir en un ángulo cualquiera, y comprobar que dicha medición este dentro del rango esperado, en caso contrario se modifica el ángulo.

Tabla 1-3: clasificación del brillo según el ángulo incidente.

Rango de brillo	Valor de 60°	Se mide con:
Alto brillo	>70 GU	Geometría 20°
Brillo medio	10-70 GU	Geometría 60°
Bajo brillo	<10 GU	Geometría 85°

Por ejemplo, si la medición efectuada en geometría 60°, es mayor que 70 GU, el ángulo de medición debe ser cambiado a 20° (alto brillo). En el mercado existen instrumentos con ángulos individuales, una combinación 20° y 60°, y un tipo que combina 20° 60° y 85° [4], esta última resulta fácil de utilizar ya que las mediciones son entregadas por los tres ángulos en el mismo instante.

Muchas industrias utilizan el medidor de especularidad en su control de calidad para medir el brillo de los productos para asegurar la consistencia en sus procesos de fabricación, un claro ejemplo son las industrias de automóviles.

### 1.3.4 Esfera integradora

La esfera de integración es un dispositivo utilizado en fotometría con el objetivo de probar y medir ciertas propiedades que tiene una fuente de luz [5], además es capaz de medir el flujo luminoso como también se usa para calibrar dispositivos que responden a espectros de luz visible o no. La estructura básica de este instrumento consiste en una esfera hueca, su diámetro puede variar de 20 centímetros hasta 2 metros. En la superficie de la esfera se encuentran diferentes aberturas o también llamados puertos, de las cuales se utilizan para la colocación de sensores, fuentes de luz o muestras a estudiar. El número de puertos varía con el uso que se le desea dar.

La pared interior de la esfera es de politetrafluoroetileno (conocido por el nombre comercial como teflón) y sulfato de bario. Esta pared va pintada de color blanco la cual sirve como difusor, es decir, la luz incidente no se refleja directamente, sino que se dispersa en todos los ángulos al interior de la esfera.



Figura 1-4: Esfera integradora (fuente: <http://www.grupoalava.com>)

Los deflectores son otra característica común de una esfera de integración. Un deflector es una pequeña barrera física que impide que la radiación de la luz directa emitida por la fuente llegue hasta sensores u otros instrumentos.

## 1.4 Diseño de iluminación en interiores

El concepto de interiores se clasifica en tres partes: Industrial, residencial y comercial (considerando oficinas).

El diseño de iluminación es aplicable tanto en nuevos diseños como para remodelar instalaciones existentes, y este comienza con un análisis destinado a reunir datos que permiten determinar las demandas, visuales, emocionales y estéticas, de iluminación y establecer los alcances y limitaciones del trabajo.

La demanda visual con una consecuencia de la realización de actividades y para determinarlas se debe evaluar la dificultad de las tareas en función de sus características y condiciones de realización. Los requerimientos emocionales surgen de la influencia que la luz ejerce sobre el estado de ánimo, motivación, sensación de bienestar y seguridad las personas. Estos dos tipos de demandas son variables entre individuos por razones de edad, entrenamiento, aptitud condiciones de visión, etc. [6]

La demanda estética se refiere a la posibilidad de crear ambientación visual, destacar la arquitectura, ornamentación, obras de arte, etc. Para esto se considera las características físicas y arquitectónicas del ambiente, así como el mobiliario y del entorno, la importancia y significado del espacio, etc. [6]

### 1.4.1 Elección del sistema de alumbrado

A partir del análisis anteriormente es posible establecer un perfil de las características que debe tener la instalación para satisfacer las distintas demandas. Los principales sistemas de alumbrados son:

- Alumbrado general
- Alumbrado localizado
- Alumbrado general y localizado
- Alumbrado modularizado

El alumbrado general (figura 1-5) se caracteriza por proveer una iluminación uniforme en todo el espacio ya que las luminarias se distribuyen en el espacio de forma general. Mientras que el alumbrado localizado (figura 1-6) se diseña para proveer valores de iluminación altos solamente en las áreas de trabajo y en sectores que interesa destacar, como acceso, áreas de riesgo de accidentes, lugares donde se quiere crear efectos decorativos, etc. Si se trata de salas donde se prevé utilizar paneles divisorios puede ser necesario modularizar el arreglo de luminarias con el fin de minimizar los efectos de proyección de sombras sobre el plano de trabajo. [6]

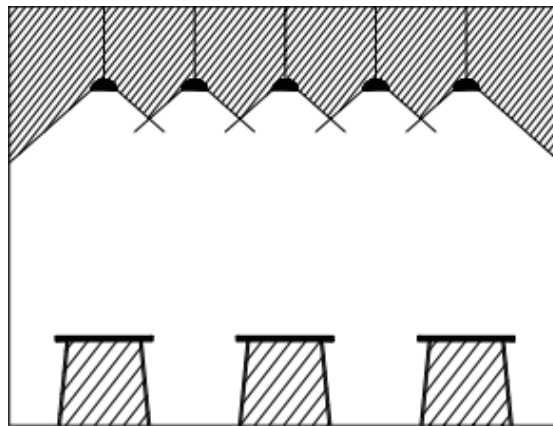


Figura 1-5: Alumbrado general (fuente: <http://www.edutecne.utn.edu.ar>)

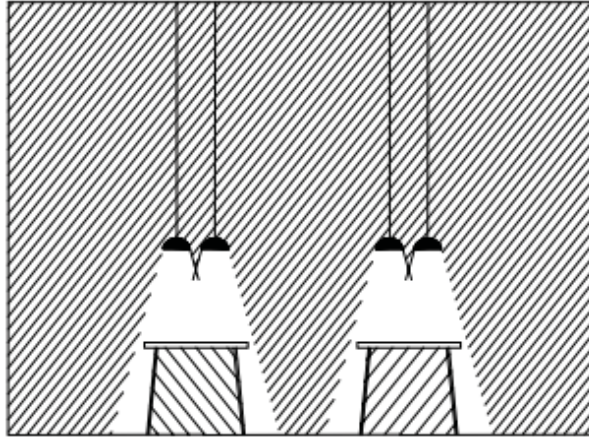


Figura 1-6: Alumbrado localizado (fuente: <http://www.edutecne.utn.edu.ar>)

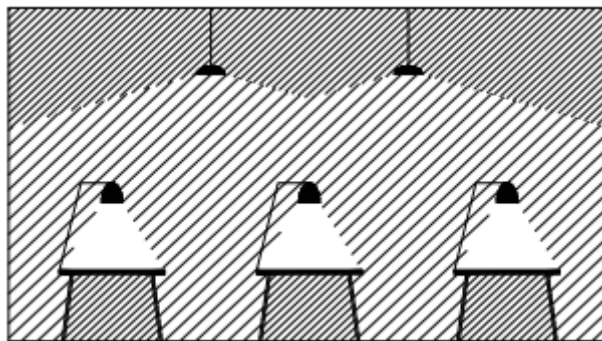


Figura 1-7: Alumbrado general y localizado (fuente: <http://www.edutecne.utn.edu.ar>)

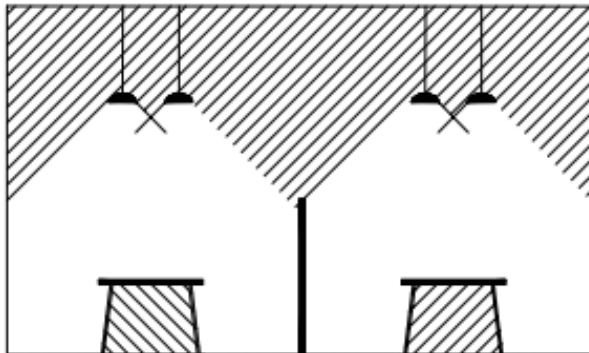


Figura 1-8: Alumbrado modularizado (fuente: <http://www.edutecne.utn.edu.ar>)

### 1.4.2 Método de los lúmenes

También llamado método de las cavidades zonales tiene como finalidad calcular el valor medio en servicio de las luminarias en un local iluminado con alumbrado general. Es práctico y fácil de usar y es por esto por lo que se utiliza mucho en la iluminación de interiores cuando la precisión necesaria no es muy alta como ocurre en la mayoría de los casos.

Este método se divide en 4 pasos

Primer paso: calcular el flujo luminoso total necesario, en este punto son necesarios los datos como las dimensiones del local, altura del plano de trabajo a iluminar con respecto al piso, nivel

de iluminación media (el cual se rige por la normativa vigente según la actividad a realizar), elección del tipo de lámpara y luminarias (según catálogos comerciales).

Segundo paso: establecer el número de luminarias a instalar.

Tercer paso: precisar el emplazamiento de las luminarias.

Cuarto paso: comprobar los resultados, esto quiere decir que los niveles de iluminación en el local cumplan con la normativa [7].

### **1.4.3 Método del punto por punto**

Este método se aplica para el tipo alumbrado localizado y general localizado donde la luz no se distribuye uniformemente como en el alumbrado general. Con esto se puede conocer los valores de iluminación en un punto específico. Para utilizar este método se necesita previamente las características fotométricas de las lámparas y luminarias a utilizar, la disposición de la misma y la altura sobre que tendrá sobre el lugar de trabajo.

Teniendo estos datos se utilizan las curvas fotométricas o curva de distribución luminosa, que se encuentran en catálogos de fabricantes de luminarias. Estas describen el comportamiento de la luminaria en línea recta como a diferentes grados de referencia respecto a la vertical entre la luminaria y el lugar de trabajo.

Luego se calcula el nivel de iluminación en los puntos requeridos, para luego determinar si la luminaria cumple con lo esperado para ser instalada.

### **1.5 Método cavidad zonal**

La idea de un método de iluminación de interiores se había propuesto anteriormente, pero no fue hasta 1920 que W. Harrison y E.A. Anderson desarrollaron un procedimiento personalizado que incluía los lúmenes directos y reflejados. Su método implicó separar el flujo de la luminaria en tres componentes (directo indirecto y horizontal) que luego fueron reemplazados por factores de utilización determinados experimentalmente que tomaron en cuenta las dimensiones de la sala y las reflectancias de las superficies de una sala.

Este método se basa en la clasificación de tres tipos de superficies de un espacio, techo, paredes y piso, considerando a las paredes como una sola superficie. A cada una de las tres superficies se le asigna una única reflectancia difusa y se supone que cada superficie está iluminada uniformemente.

Para obtener la iluminancia promedio en el plano de trabajo se necesita determinar el flujo luminoso total que llega a ese plano. Este flujo se compone de dos componentes: flujo que viene directamente de las luminarias al plano de trabajo (componente directo y el flujo que es (repetidamente) reflejado desde las superficies de la habitación y que luego alcanzan el plano de trabajo (componente reflejado).



Cavidad de techo: Es el área medida desde el plano de las luminarias al techo. Para luminarias colgantes existirá cavidad de techo, por el contrario, si las luminarias están colocadas directamente en el techo o empotradas en el mismo, no existirá cavidad de techo.

Cavidad de local: Es el espacio entre el plano de trabajo donde se desarrolla la tarea y la parte inferior de la luminaria; el plano de trabajo se encuentra localizado normalmente por encima del nivel del piso, como hay casos donde el plano de trabajo es considerado a nivel de piso. En el lenguaje de iluminación la distancia desde el plano de trabajo a la parte inferior de la luminaria es llamada altura de montaje de la luminaria.

Cavidad de piso: Es el espacio desde el piso a la parte superior del plano de trabajo. Para escritorios de oficinas, esta distancia es aproximadamente de 76 centímetros, para bancos de trabajo de tareas difíciles en industrias esta distancia puede llegar a 92 centímetros; si el trabajo se realiza directamente en el piso, no existe cavidad de piso.

La teoría básica en este método de cálculo de iluminación es que la luz producida por una luminaria se refleja por todas las superficies del local. Las reflexiones múltiples de la luz desde la luminaria y desde las superficies del local actúan para producir la luz en el plano de trabajo.

En la figura 1-9 se muestran las cavidades zonales de techo, local y piso.

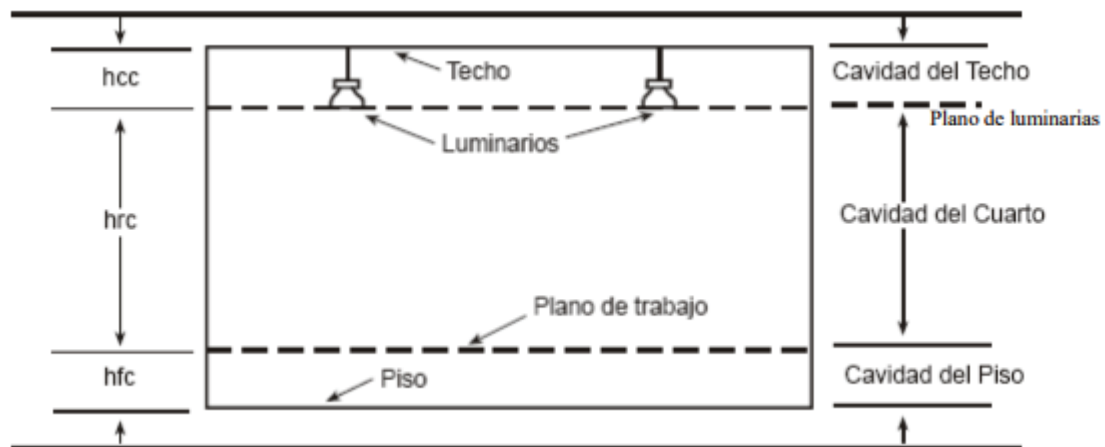


Figura 1-9: Cavidades techo, cuarto y piso

Siendo:

- Hcc = Altura de cavidad del techo
- Hcr = Altura de cavidad del local o cuarto
- Hfc = Altura de cavidad de suelo

Para este método es importante determinar: las dimensiones del local, las reflectancias del local de techo, paredes y piso; las características de la lámpara (factor de depreciación y coeficiente de utilización), efectos ambientales (polvo, suciedad y temperatura), mantenimiento planeado del sistema de iluminación.

### 1.5.1 Procedimiento

En primer lugar, es necesario conocer las dimensiones del local y la altura del plano de trabajo (la altura del suelo a la superficie de la mesa de trabajo), normalmente de 0,85 metros como se representa en la figura 1-10.

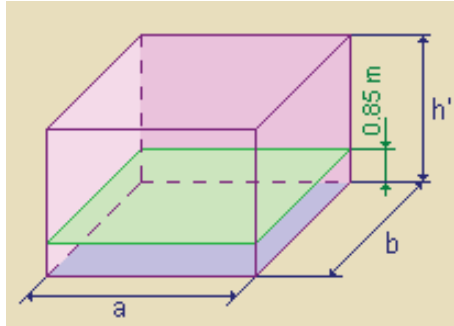


Figura 1-10: dimensiones del local

Determinar el nivel de iluminancia media ( $E_m$ ) que se desea proyectar. Este valor depende del tipo de actividad a realizar en el local, estos datos se pueden obtener según la normativa chilena (Nch Elec. 4/2003), estos datos están representados en las tablas 1-1 y 1-2.

Escoger el tipo de lampara (incandescente, fluorescente, etc.) más adecuado de acuerdo con el tipo de actividad a realizar.

Escoger el sistema de alumbrado que mejor se adapte a las necesidades y las luminarias correspondientes.

Determinar la altura de suspensión de las luminarias según el sistema de iluminación escogido.

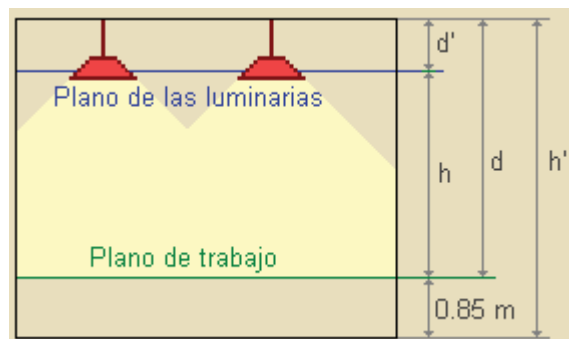


Figura 1-11: Altura del local

Donde:

- $h$  = altura entre el plano de trabajo y las luminarias
- $h'$  = altura del local
- $d$  = altura del plano de trabajo al techo
- $d'$  = altura del plano de trabajo a las luminarias

Tabla 1-4: altura de luminarias según el tipo de iluminación

Altura de las luminarias	
Locales de altura normal (oficinas, viviendas, aulas etc.)	Lo más altas posibles
	Mínimo:
	$h = \frac{2}{3}(h' - 0,85)$
Locales con iluminación directa, semidirecta y difusa	Óptimo:
	$h = \frac{4}{5}(h' - 0,85)$
	$d' = \frac{1}{4}(h' - 0,85)$
Locales con iluminación indirecta	$h = \frac{3}{4}(h' - 0,85)$

### 1.5.2 Índice del local

La fracción del flujo luminoso emergente de un grupo luminarias que llega al plano de trabajo depende de las proporciones del local y los factores de reflexión de las diversas superficies del mismo. Una sala alta y angosta tiene una absorción de luz por las paredes mayor que una sala ancha y relativamente baja. Para calcular el índice del local (K) a partir de la geometría de este. En el caso del método europeo se calcula como:

Sistema de iluminación	Índice del local
Iluminación directa, semidirecta, directa-indirecta y general difusa	$K = \frac{a * b}{h * (a + b)}$
Iluminación indirecta y semidirecta	$K = \frac{3 * a * b}{2(h + 0,85) * (a + b)}$

Donde k es un número comprendido entre 1 y 10. A pesar de que se puede obtener valores mayores de 10 con las fórmulas, no se consideran, pues la diferencia entre usar 10 o un número mayor en los cálculos es despreciable.

Determinar los coeficientes de reflexión de techo, paredes y suelo. Estos valores se encuentran normalmente tabulados para los diferentes tipos de materiales, superficies y acabado. Si no se disponen de ellos, pueden ser tomados de la siguiente tabla 1-5.

Tabla 1-5: Factores de reflexión

	color	Factor de reflexión
techo	Blanco o muy claro	0,7
	Claro	0,5
	Medio	0,3
Paredes	Claro	0,5
	Medio	0,3
	Oscuro	0,1
suelo	Claro	0,3
	Oscuro	0,1

### 1.5.3 Factor de utilizacion

El coeficiente de utilización (CU) es la fracción de los lúmenes de la lampara que finalmente alcanzan el plano de trabajo. Los valores de CU para un gran número de luminarias utilizadas en espacios interiores se han calculado utilizando la teoría de transferencia de flujo, el cual será analizada en el desarrollo del proyecto. Este factor se encuentra en tablas de datos de luminarias considerando las dimensiones de la sala y la reflectancia de las superficies de la habitación. En resumen, el CU es la proporción de lúmenes que inciden desde una luminaria a un plano de trabajo en relación con los lúmenes emitidos por la lampara sin las luminarias.

Tipo de aparato de alumbrado	Índice del local k	Factor de utilización ( $\eta$ )								
		Factor de reflexión del techo								
		0.7			0.5			0.3		
		Factor de reflexión de las paredes								
		0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1
	1	.28	.22	.16	.25	.22	.16	.26	.22	.16
	1.2	.31	.27	.20	.30	.27	.20	.30	.27	.20
	1.5	.39	.33	.26	.36	.33	.26	.36	.33	.26
	2	.45	.40	.35	.44	.40	.35	.44	.40	.35
	2.5	.52	.46	.41	.49	.46	.41	.49	.46	.41
	3	.54	.50	.45	.53	.50	.45	.53	.50	.45
	4	.61	.56	.52	.59	.56	.52	.59	.56	.52
	5	.63	.60	.56	.63	.60	.56	.62	.60	.56
	6	.68	.63	.60	.66	.63	.60	.65	.63	.60
	8	.71	.67	.64	.69	.67	.64	.68	.67	.64
	10	.72	.70	.67	.71	.70	.67	.71	.70	.67

Figura 1-12: Ejemplo de tabla de factor de utilización

A medida que el factor K aumenta, con reflectancias fijas, se espera el que el CU disminuya por que la sala se hace más alta y más flujo de luminarias se reflejan desde la pared, donde hay algo de absorción.

Determinar el factor de mantenimiento (fm) o conservación de la instalación. Este coeficiente dependerá del grado de suciedad ambiental y de la frecuencia de la limpieza del local. Para limpieza periódica anual se pueden tomar los siguientes valores mostradas en la tabla 1-6:

Tabla 1-6: Factor de mantenimiento

Ambiente	Factor de mantenimiento (fm)
limpio	0,8
Sucio	0,6

### 1.5.4 Calculos

Se calcula el flujo luminosos total necesario utilizando la siguiente formula:

$$\Phi_T = \frac{E * S}{\eta * fm} \tag{1-7}$$

Donde:

$\Phi_T$  es el flujo luminoso total, E es la iluminancia media deseada, S es la superficie del plano de trabajo,  $\eta$  es el factor de utilización y fm es el factor de mantenimiento

Calcular el número de luminarias:

$$N = \frac{\Phi_T}{n * \Phi_L} \quad (1-8)$$

Donde N es el número de luminarias,  $\Phi_T$  es el flujo luminoso total,  $\Phi_L$  es el flujo luminoso de una lámpara y n es el número de lámparas por luminaria

### 1.5.5 Emplazamiento de las luminarias

Una vez calculado el número mínimo de lámparas y luminarias se procede a distribuirlas sobre la planta del local. En los locales rectangulares las luminarias se reparten de forma uniforme en filas paralelas a los ejes de simetría del local según las siguientes fórmulas:

$$N \text{ ancho} = \sqrt{\frac{N \text{ total}}{\text{largo}} * \text{ancho}} \quad (1-9)$$

$$N \text{ largo} = N \text{ ancho} * \left(\frac{\text{largo}}{\text{ancho}}\right) \quad (1-10)$$

Donde N es el número de luminarias.

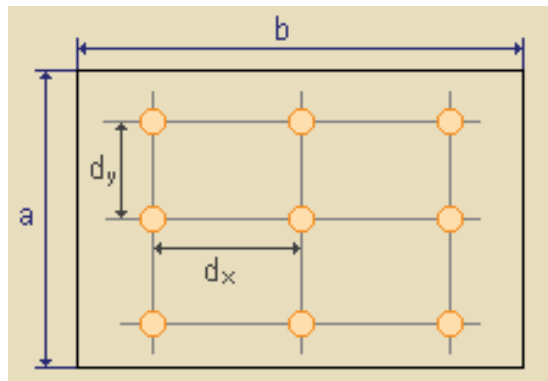


Figura 1-13: Esquema distribución de luminarias

La distancia máxima de separación entre las luminarias dependerá del ángulo de apertura del haz de luz y de la altura de las luminarias sobre el plano de trabajo. Un ejemplo de este en la siguiente figura

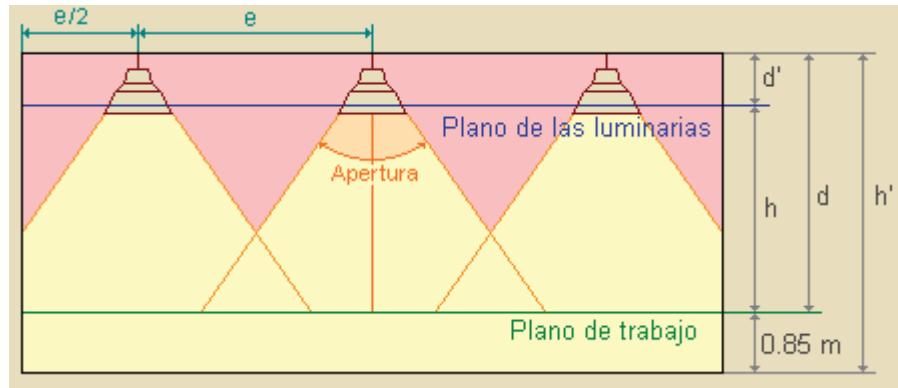


Figura 1-14: Ejemplo distancia luminarias

Como se puede observar fácilmente, mientras más abierto sea el haz y mayor la altura de las luminarias, más superficie iluminará, aunque será menor la iluminancia que llegará al plano de trabajo. De la misma manera, las luminarias próximas a la pared necesitan estar más cerca para iluminarla (normalmente la mitad de distancia). En resumen, la separación entre luminarias se refleja en la siguiente tabla

Tabla 1-7: Separación de luminaria según su tipo

Tipos de luminarias	Altura del local	Distancia máxima entre luminarias
Intensiva	>10 m	$e \leq 1,2 h$
Extensiva	6 – 10 m	$e \leq 1,5 h$
Semi extensiva	4 – 6 m	$e \leq 1,5 h$
extensiva	< 4 m	$e \leq 1,6 h$
	Distancia pared - luminaria	$e/2$

Según el tipo de luminaria a utilizar, estas se pueden clasificar según el comportamiento del haz luminoso emitido, se clasifican en intensiva, extensiva y semi extensiva.

- Luminaria intensiva: el haz luminoso emitido es concentrado, con un ángulo que varía de  $0^\circ$  a  $40^\circ$  respecto a la normal formada por el suelo.
- Luminaria semi extensiva: a diferencia de la intensiva, el haz de luz es abierto, con un ángulo que varía de los  $40^\circ$  a  $60^\circ$  con respecto a la normal.
- Luminaria extensiva: el ángulo en este caso varía de  $60^\circ$  a  $70^\circ$  respecto a la normal

En el caso que la distancia de separación es mayor que la distancia máxima admitida, quiere decir que la distribución luminosa obtenida no es del todo uniforme. Esto puede deberse a que la

potencia de las lámparas escogidas sea excesiva. En caso conveniente es necesario rehacer los cálculos probando como luminarias menos potentes, o emplear menos luminarias.

### 1.5.6 Comprobar resultados

Por último, queda comprobar la validez de los resultados midiendo la iluminación media obtenida en las instalaciones diseñadas y compararla con las recomendadas en las tablas.

$$E_m = \frac{n * \Phi_L * \eta * fm}{S} \geq E_{tablas} \quad (1-11)$$

## 1.6 Proyecto a realizar

El proyecto que lleva por nombre “Determinación de factor de reflexión in situ para interiores” tiene como objetivo desarrollar un método para determinar los factores o índices de reflexión que tienen las diferentes superficies de un lugar. Para lograr esto es necesario el estudio de la reflexión de la luz en diferentes tipos de superficies, los factores de reflexión que presentan diferentes materiales y colores y entender que es y cómo funciona una esfera de integración para ser utilizada en este método.

Además, es necesario estudiar y analizar los diferentes métodos existentes utilizados para medir el factor de reflexión con la esfera de integración.

## 1.7 Objetivos del proyecto

### 1.7.1 Objetivo general

Desarrollar un método para determinar los factores de reflexión de las superficies en recintos interiores.

### 1.7.2 Objetivo específico

Determinar los factores de reflexión de las superficies de recintos con miras a usarlas como insumos en los programas de cálculo de iluminación.



## 2 Solución y marco teórico

En el presente capítulo se describe el concepto de reflexión de la luz como también el índice o factor de reflexión que presentan diferentes materiales y colores que forman parte de recintos interiores. Luego se explica la propuesta del proyecto detalladamente como solución a la problemática planteada en el capítulo 1.

### 2.1 Reflexión de la luz

La reflexión de la luz se define como el cambio de dirección de las ondas luminosas al incidir sobre una superficie. Para entender esto se debe tener en cuenta 3 propiedades básicas de la luz. La primera es que se propaga en línea recta, la segunda es que se refleja cuando llega a cualquier superficie que sea reflectante y la tercera es que cambia de dirección en el momento en que pasa de un medio a otro.

Dependiendo de las características de la superficie, es posible distinguir entre cuatro tipos de reflexión.

- Reflexión especular
- Reflexión difusa
- Reflexión extendida o compuesta
- Reflexión mixta

#### 2.1.1 Reflexión especular

Este tipo de reflexión ocurre cuando el material sobre el que incide los haces luminosos es perfectamente liso y pulido, no solo al tacto, sino a un nivel microscópico. Algunos ejemplos de este tipo de superficies son los espejos, los metales, vidrios polarizados, etc.

Los haces de luz viajan paralelos entre sí, y al entrar en contacto con la superficie todos los rayos son reflejados en la misma dirección (figura 2-1), lo que provoca una imagen nítida, con los bordes bien definidos. Este fenómeno se debe a que todos los puntos del material están perfectamente alineados, por lo que cada uno de los rayos chocará con ellos con el mismo ángulo de incidencia, en pocas palabras la luz reflejada tendrá la misma dirección.

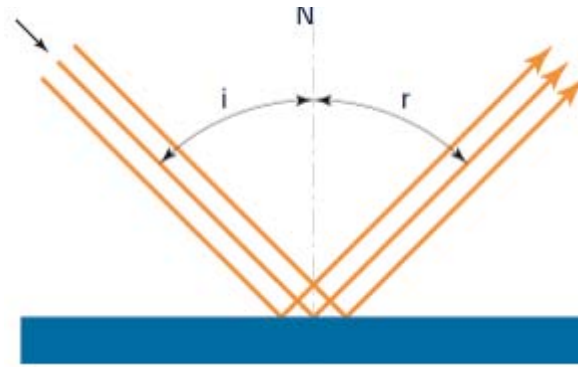


Figura 2-1: Reflexión especular (fuente: <http://aicvigo.blogspot.cl>)

### 2.1.2 Reflexión difusa

La reflexión difusa ocurre cuando el material sobre el que inciden los haces luminosos es rugoso (figura 2-2), no solo al tacto, sino que a un nivel microscópico. Algunos ejemplos son la madera, el papel, etc. Los haces de luz al entrar en contacto con la superficie son reflejados en distintas direcciones, lo que provoca una imagen distorsionada.

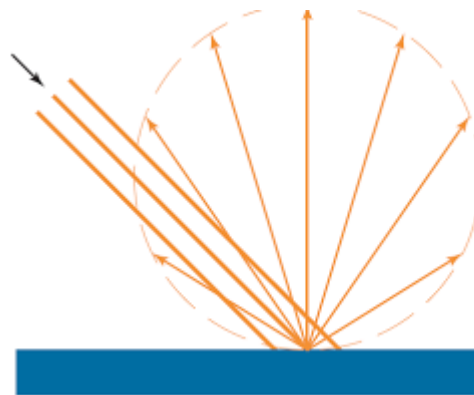


Figura 2-2: Reflexión difusa (fuente: <http://aicvigo.blogspot.cl>)

### 2.1.3 Reflexión extendida

Es la combinación entre la reflexión difusa y la especular, se diferencia de la difusa porque tiene un componente direccional dominante (figura 2-3), pero no único como la especular.



Figura 2-3: Reflexión compuesta o extendida ((fuente: <http://aicvigo.blogspot.cl>)

### 2.1.4 Reflexión mixta

Es una mezcla entre la reflexión difusa, la especular y la extendida (figura 2-4), es la que se da en la mayoría de los materiales reales.



Figura 2-4: Reflexión mixta (fuente: <http://aicvigo.blogspot.cl>)

## 2.2 Factor de reflexión

También llamado coeficiente de reflexión ( $\rho$ ), indica el porcentaje de luz que se refleja respecto a la onda incidente. Se obtiene dividiendo la cantidad de luz que se refleja por la que incide en la superficie. El rayo de luz reflejado nunca puede ser nulo.

$$\text{reflectancia} = \frac{\text{flujo reflejado}}{\text{flujo incidente}} \quad (2-1)$$

El poder reflectante de las superficies que rodean a un local juega un papel importante en el resultado final de un proyecto de iluminación. Las luminarias emiten la luz de diversas formas según el tipo de distribución luminosa. Cuando esta emisión luminosa es del tipo abierta, habrá una gran parte de luz que llegara en forma directa al plano de trabajo, es decir sin obstáculos, pero habrá también una porción importante de esa emisión que caerá sobre las paredes. Esa parte de la luz emitida por la luminaria podrá ser reflejada y aprovechada en mayor o menor grado según el índice de reflexión de la superficie.

En la mayoría de las simulaciones utilizadas en el diseño de iluminación, se asume un factor de reflexión de 0.5 para los techos, 0.3 para las paredes y 0.1 para el suelo para los cálculos correspondientes. La siguiente tabla 2-1 presenta algunos índices de reflexión dependiendo del color del lugar.

Tabla 2-1: Factor de reflexión (fuente: <http://recursos.citcea.upc.edu>)

	color	Factor de reflexión
techo	Blanco o muy claro	0,7
	Claro	0,5
	Medio	0,3
Paredes	Claro	0,5
	Medio	0,3
	Oscuro	0,1
suelo	Claro	0,3
	Oscuro	0,1

El software DIALux tiene la característica de poder utilizar datos exactos del factor de reflexión dependiendo de cada material y color de las paredes techos y suelos del lugar, logrando una simulación realista.

### 2.2.1 Factor de reflexión colores

Al igual que los materiales analizados anteriormente, el color de una superficie o material afecta el factor de reflexión. Existe una gran variedad de pinturas en el mercado, tales como barnices, esmaltes, lacas, colorantes, entonadores y selladores; cada uno con sus propiedades físicas y químicas, que son tomadas en cuenta al momento de elegir el producto adecuado según la superficie.

Para el caso del proyecto se tomarán en cuenta las pinturas opacas, dejando de lado el barniz y el esmalte sintético, ya que esta tiene un acabado liso lo cual dejan las superficies con brillo.

En la siguiente tabla se mencionan algunos colores con el índice de reflexión correspondiente.

Tabla 2-2: índice de reflexión colores

Color	Reflexión en %
Blanco	70-75
Crema claro	70-80
Amarillo claro	50-70
Verde claro	45-70
Gris claro	45-70
Celeste claro	50-70
Rosa claro	45-70
Marrón claro	30-50
Negro	4-6
Gris oscuro	10-20
Amarillo oscuro	40-50
Verde oscuro	10-20
Rojo oscuro	10-20

### 2.2.2 Factor de reflexión materiales

Actualmente existe una gran variedad de materiales utilizados en la construcción de recintos interiores, para el caso del proyecto se tomarán en cuenta los materiales utilizados en interiores de residenciales, locales educacionales como asistenciales. Entre ellos se destacan la madera, ladrillo, cemento, hormigón armado entre otros.

En la siguiente tabla se mencionan algunos índices de reflexión dependiendo del material.

Tabla 2-3: índice de reflexión materiales

Material	Reflexión en %
Cemento claro	35-55
Cemento oscuro	20-30
Hormigón claro	30-50
Hormigón oscuro	15-25
Ladrillo claro	30-40
Ladrillo oscuro	15-25
Mármol blanco	60-70
Granito	15-25
Madera clara	30-50
Madera oscura	10-25
Aluminio mate	55-60
Aluminio pulido	80-90
Acero pulido	55-65

### 2.3 Solucion propuesta

La finalidad del proyecto es crear un instrumento que sea capaz de medir el factor o índice de reflexión de paredes, techos y pisos que forman parte de recintos interiores. El concepto de interiores se clasifica en tres partes: industrial, residencial y comercial.

Este instrumento será utilizado en superficies que presenten reflexión difusas y mixtas, como maderas, ladrillos, hormigón armado, alfombras entre otros.

El instrumento estará construido por una esfera integradora, un luxómetro y una luminaria pequeña. La esfera integradora a utilizar debe tener las características necesarias para poder ser utilizada de forma sencilla, en este caso la esfera tendrá un diámetro de 20 a 30 centímetros.

La esfera integradora tendrá 3 orificios, de los cuales serán usados para la instalación de la fuente de luz, otra para el luxómetro y el tercero quedara libre para las diferentes muestras a estudiar.

### 2.3.1 ¿Por qué una esfera integradora?

El concepto de esfera, como forma de medir el flujo emitido por una fuente, fue introducido por W.E. Sumpner en 1892. Para el año 1892, la esfera fue propuesta y desarrollada como fotómetro por R. Ulbricht (1849-1923 publicado en 1900 [8]).

La esfera integradora o esfera de Ulbricht, es una esfera hueca, cubierta en su interior con una pintura especial de color blanco, cuya característica es presentar una reflexividad lo más uniforme posible a las diferentes longitudes de ondas percibidas por el ojo humano.

Para que la esfera se comporte como una esfera integradora, se coloca una placa (cubierta de la misma pintura de la esfera), cuyo fin es evitar que la luz incida directamente sobre el elemento de medición desde la muestra. De esta manera y en forma ideal, se asume que la esfera integradora es una superficie Lambertiana, con reflectancia no selectiva. Es decir que para cualquier longitud de onda (del espectro visible) se tiene el mismo índice de reflectancia en todos los puntos de la esfera. Además, por la geometría de la esfera y por el hecho de que la luz no incide directamente sobre el punto de medición, no existen puntos privilegiados en su superficie interior. En estas condiciones, y asumiendo la fuente luminosa como puntual frente a la esfera, se puede probar que el flujo luminoso es proporcional a la intensidad luminosa.

Las aberturas donde la luz puede entrar o salir, usada para detectores y fuentes, normalmente se llaman puertos. El área total de todos los puertos debe ser pequeña, menos de aproximadamente el 5% del área de superficie de la esfera, para que los supuestos teóricos sean válidos. Por lo tanto, los puertos no utilizados deben tener tapas o enchufes recubiertas con el mismo material que el resto de la esfera.

### 2.3.2 Transferencia de flujo, factor de configuración y factores de forma.

La teoría de transferencia de flujo, estudiada en la guía de iluminación IES LIGHTING HANDBOOK 1981, se puede entender suponiendo que una superficie A emite o refleja el flujo de una manera completamente difusa. Parte de este flujo cae sobre la superficie B. El porcentaje de flujo total emitido por A que cae sobre B se llama factor de forma de B con respecto a A  $f_{a \rightarrow b}$ . Ahora suponiendo una sala como en la siguiente figura 2-5.

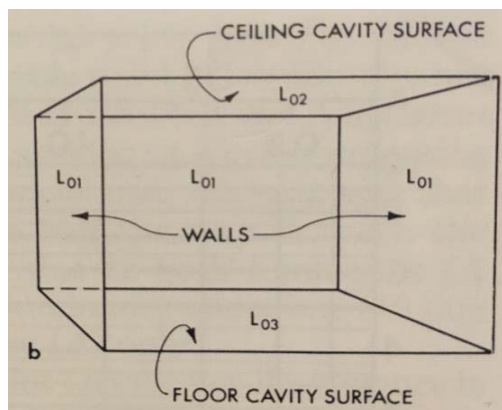


Figura 2-5: Diagrama transferencia de flujo

Suponiendo que todas las paredes tienen la misma reflectancia y que el sistema de iluminación es simétrico. Esto permite que las cuatro paredes se agrupen y se traten como una sola superficie. Ahora suponiendo que las tres superficies internas son completamente difusas y tienen luminancias iniciales  $L_{01}, L_{02}$  y  $L_{03}$  respectivamente. Estas luminancias iniciales podrían, por ejemplo, ser debidas al flujo que cae directamente sobre ellas desde una luminaria dentro del recinto. Expresando la luminancia en candelas por unidad de área y la iluminancia en lúmenes por unidad de área. Como habrá reflexiones, las luminancias finales  $L_{01}, L_{02}$  y  $L_{03}$  serán más altas que las iniciales. Este aumento se debe a la luz que cae sobre las superficies desde otras superficies de la habitación. La luminancia final de la superficie 3 se puede expresar de la siguiente manera:

$$L_3 = L_{03} + \frac{1}{\pi} \rho_3 E_3 \quad (2-2)$$

Donde  $\rho_3$  es la reflectancia de la superficie 3 y  $E_3$  es la iluminancia en esa superficie debido a las otras superficies en la habitación. Ahora se necesita encontrar  $E_3$ .

Aquí es donde entra el factor de forma. El flujo que cae sobre la superficie 3 desde la superficie 2 será igual a la emisión total de la superficie 2 veces el factor de forma  $A f_{2 \rightarrow 3}$ . La emisión total de la superficie 2 será igual a  $\pi L_2 A_2$ , donde  $L_2$  es la luminancia final de la superficie 2 y  $A_2$  es su área.

Esto ocurre porque la superficie emite difusamente y la luminancia de un emisor difuso es la salida (flujo por unidad de área emitida) dividida por la iluminancia en la superficie 3 debido a la superficie 2, por lo tanto:

$$E_{3(2)} = \frac{Flux}{\text{área}} = \frac{\pi L_2 A_2 f_{2 \rightarrow 3}}{A_3} \quad (2-3)$$

Esta ecuación, y las que siguen se pueden simplificar haciendo el uso de lo que se denomina relación de reciprocidad  $A_m f_{m \rightarrow n} = A_n f_{n \rightarrow m}$  cuando se hace esto, la ecuación se reduce a:

$$E_{3(2)} = \pi L_2 f_{3 \rightarrow 2} \quad (2-4)$$

Aplicando el mismo razonamiento al flujo de la superficie 1, se obtiene la ecuación para  $L_3$

$$L_3 = L_{03} + \rho_3 (L_2 f_{3 \rightarrow 2} + L_1 f_{3 \rightarrow 1}) \quad (2-5)$$

Ahora para la superficie 2

$$L_2 = L_{02} + \rho_2 (L_3 f_{2 \rightarrow 3} + L_1 f_{2 \rightarrow 1}) \quad (2-6)$$

Sin embargo, la superficie 1, las paredes tienen una diferencia con respecto a las mencionadas anteriormente. No todo el flujo de este va a las otras superficies. Parte de esto va a otras partes de sí mismo. Este intercambio de flujo entre las paredes debe tenerse en cuenta. Hay un componente de iluminancia en las paredes debido a las paredes mismas:

$$E_{1(1)} = \pi L_1 f_{1 \rightarrow 1} \quad (2-7)$$

Por lo tanto, el resultado es:



$$L_1 = L_{01} + \rho_1(L_1 f_{1 \rightarrow 1} + L_2 f_{1 \rightarrow 2} + L_3 f_{1 \rightarrow 3}) \quad (2-8)$$

Con estas tres ecuaciones y los factores de forma, se puede determinar cualquier iluminación interior o luminancia, ya que  $L_1, L_2$  y  $L_3$  son las incógnitas en un conjunto de tres ecuaciones simultáneas. La iluminación en la superficie 3 (plano de trabajo) se obtiene dividiendo  $\pi L_3$  por  $\rho_3$ .

El conjunto anterior de ecuaciones es la base para generar las tablas de coeficientes de utilización, los coeficientes de luminancia de la pared y los coeficientes de luminancia de la cavidad del techo.

Ahora el mismo con la siguiente ecuación básica de luminancia.

$$L = \frac{d^2 \Phi}{d_w d_A \cos(\theta)} \quad (2-9)$$

Esta ecuación describe la luminancia en una dirección dada como el flujo luminoso por unidad de ángulo sólido y por unidad de área proyectada en esa dirección. Considerando el flujo luminoso que se irradia desde elementos direccionales de dos superficies como se muestra en la siguiente figura.

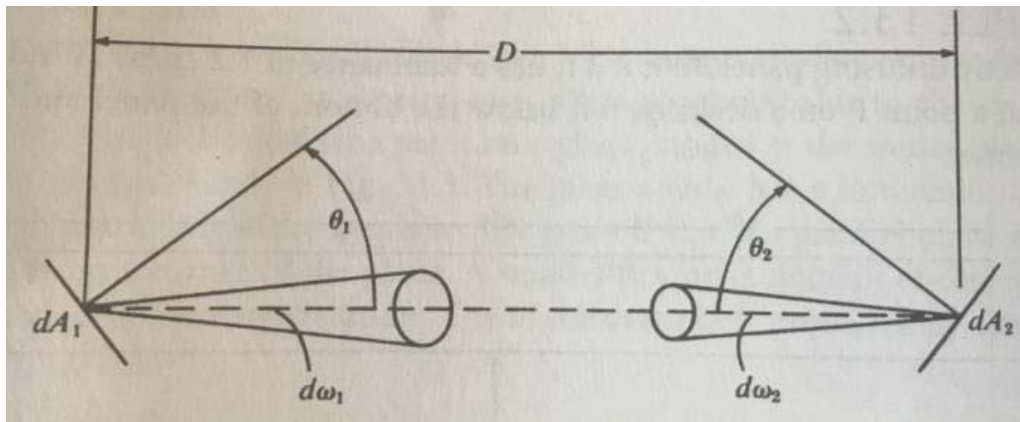


Figura 2-6: Transferencia de flujo

El cono definido por  $d_{w1}$  cruza la superficie 2 en  $d_{A2}$  y el cono definido por  $d_{w2}$  cruza la superficie 1 en  $d_{A1}$

$$L_1 = \frac{d^2 \Phi_{12}}{d_{w1} d_{A1} \cos(\theta_1)} \quad (2-10)$$

$$L_2 = \frac{d^2 \Phi_{21}}{d_{w2} d_{A2} \cos(\theta_2)} \quad (2-11)$$

Donde  $\Phi_{12}$  es el flujo desde  $d_{A1}$  a  $d_{A2}$  y  $\Phi_{21}$  el flujo que va de  $d_{A2}$  a  $d_{A1}$ .  $L_1$  es la luminancia de  $d_{A1}$  en la dirección de  $d_{A2}$  y  $L_2$  la luminancia de  $d_{A2}$  en dirección de  $d_{A1}$

Ahora modificando las ecuaciones

$$d^2 \Phi_{12} = L_1 \cos(\theta_1) d_{A1} \left( \frac{d_{A2} \cos(\theta_1)}{D^2} \right) \quad (2-12)$$

$$d^2 \Phi_{21} = L_2 \cos(\theta_2) d_{A2} \left( \frac{d_{A1} \cos(\theta_1)}{D^2} \right) \quad (2-13)$$

Ahora considerando que la superficie 1 es una superficie finita de área  $A_1$  en lugar de una superficie diferencial de área  $d_{A1}$

$$d\Phi_{12} = L_1 \int_{A_1} \frac{\cos(\theta_1) \cos(\theta_2) d_{A2}}{D^2} d_{A1} \quad (2-14)$$

$$d\Phi_{21} = L_2 \int_{A_2} \frac{\cos(\theta_1) \cos(\theta_2) d_{A2}}{D^2} d_{A1} \quad (2-15)$$

Donde se supone que las luminancias  $L_1$  y  $L_2$  son constantes (las superficies  $A_1$  y  $d_{A2}$  son lambertianas) por lo tanto:

$$\frac{d\Phi_{12}}{d\Phi_{21}} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{M_1}{M_2} = \frac{M_1}{d\Phi_2/d_{A2}} \quad (2-16)$$

Donde  $M_1$  y  $M_2$  son las exitancias luminosas de  $A_1$  y  $d_{A2}$  respectivamente, y  $d\Phi_2$  es el flujo total emitido por  $d_{A2}$ . Por lo tanto:

$$\frac{d\Phi_{21}}{d\Phi_2} = \frac{d\Phi_{12}}{M_1 d_{A2}} = \frac{E_2}{M_1} = C_{21} \quad (2-17)$$

La ecuación anterior es la definición del factor de configuración. Este factor  $C_{21}$  es la fracción de flujo emitido por  $d_{A2}$  que recibe directamente  $A_1$ . Se obtiene como la relación de la iluminancia en  $d_{A2}$  producida por el flujo recibido directamente de  $A_1$  debido a la salida luminosa de  $A_1$ . En el sentido de que el factor de configuración de 2 a 1 se define en términos de la iluminancia en un punto en 2 producido por la salida luminosa de un área 1, pero es la dirección de transferencia de flujo que determinan los subíndices. Las derivadas se repiten suponiendo que 1 y 2 son áreas finitas. Obteniendo como resultado la siguiente ecuación.

$$\frac{\Phi_{21}}{\Phi_2} = \frac{\Phi_{12}}{M_1 d_{A2}} = \frac{E_2}{M_1} = f_{21} \quad (2-18)$$

El factor de forma es la fracción de flujo emitido por el área  $A_2$  que recibe directamente el área  $A_1$  y se obtiene como la relación de la iluminancia promedio de  $A_2$  producida por el flujo recibido directamente de  $A_1$  debido a la exitancia luminosa de  $A_1$

### 2.3.3 Teoría esfera integradora

Ahora considerando el factor de forma y factor de configuración, se puede desarrollar y entender el concepto de la teoría de la esfera integradora, estudiada en “the luminaire reflector reflectance in the fixture efficiency” de Enrique Piraino (1985). Considerando la siguiente figura:

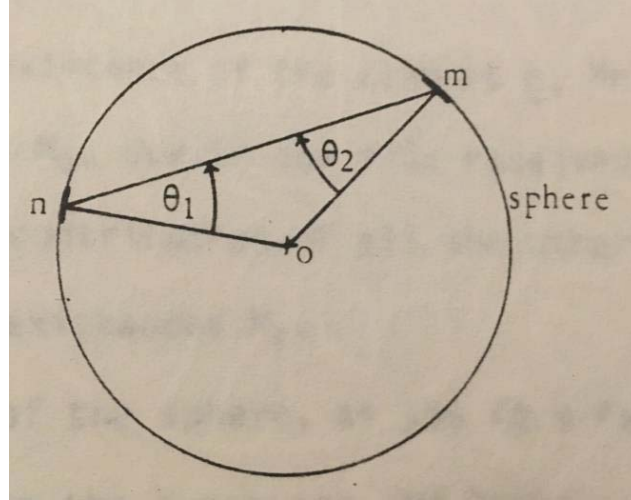


Figura 2-7: Relación de dos elementos n y m de la esfera [8]

Usando el concepto de factor de forma aplicada a la esfera de integración

$$f_{n \rightarrow m} = \frac{1}{A_n} \int C_{n,m} dA_m \quad (2-19)$$

$$f_{n \rightarrow m} = \frac{1}{\pi A_n} \iint \frac{1}{r^2} \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) dA_n * dA_m \quad (2-20)$$

Se sabe que:

$$\cos(\theta_1) = \cos(\theta_2) = \frac{r}{2R} \quad (2-21)$$

Y si  $A_n$  y  $A_m$  son lo suficientemente pequeños, entonces la variación de los cosenos y r sobre las áreas será insignificante.

$$f_{n \rightarrow m} = \frac{1}{\pi A_n} * \frac{r^2}{4R^2} * A_n * A_m \quad (2-22)$$

Considerando el análisis de transferencias de flujo de rebotes múltiples se establecen las siguientes definiciones

- $M_{0n}$  = salida inicial de la superficie n
- $M_n$  = salida luminosa final de la superficie n
- $\rho_n$  = reflectancia de la superficie n
- $E_n$  = iluminancia en la superficie n debido a las otras superficies
- $f_{mn}$  = fracción de flujo emitido por la superficie m que cae en la superficie n

Inicial indica el flujo que sale de la superficie antes de las reflexiones y final significa el flujo total que finalmente abandona superficie, incluido el flujo reflejado. Así la salida final luminosa de la superficie n es su salida inicial, debido a las fuentes, más la exitancia causada por los flujos de todas las otras superficies debido a las reflexiones, esto se expresa como:

$$M_n = M_{0n} + \rho_n E_n \quad (2-23)$$

Además:

$$E_{n(m)} = \frac{M_m A_m f_{mn}}{A_n} = M_m f_{nm} \quad (2-24)$$

Donde  $E_{n(m)}$  es la contribución de la superficie m a la iluminancia  $E_n$ .

$$M_n = M_{0n} + \rho_n \sum_{i=1}^m M_m f_{nm} \quad (2-25)$$

Ahora aplicando el análisis a la esfera se tiene que

$$M_n = M_{0n} + \rho_n \left[ M_1 A_1 f_{f1} \rightarrow \frac{n}{An} + M_2 A_2 f_{f2} \rightarrow \frac{n}{An} + \dots \right] \quad (2-26)$$

$$M_n = M_{0n} + \rho_n \frac{Am}{A_0} \sum_{i=1}^m M_i \quad (2-27)$$

- $m =$  suponiendo que la esfera se divide en m elementos iguales
- $A_0 = 4\pi R^2$

Al usar la exitancia inicial de cada elemento, la fuente flujo  $\Phi_0$  puede calcularse como:

$$\Phi_0 = \sum_{i=1}^m M_{0i} * \frac{A_i}{\rho_i} [\text{Lumenes}] \quad (2-28)$$

En la esfera se supone que los  $\rho_i$  son constantes e iguales para cada elemento, así como los  $A_i$  son:

$$A_i = \frac{A_0}{m} \quad (2-29)$$

$$\Phi_0 = \frac{A_0}{m * \rho} \sum_{i=1}^m M_{0i} \quad (2-30)$$

La salida luminosa final en un punto n  $M_n$  es la salida de un elemento filtrado. Se puede expresar como una sumatoria por las múltiples reflexiones

$$\sum_{i=1}^m M_{0i} = \sum_{i=1}^m M_i - \sum_{i=1}^m M_n \quad (2-31)$$

Utilizando la ecuación del flujo  $\Phi_0$  se tiene que

$$\sum_{i=1}^m M_{0i} = \Phi_0 * m * \frac{\rho}{A} \quad (2-32)$$

Entonces:

$$\Phi_0 * m * \frac{\rho}{A_0} = \sum_{i=1}^m M_i - \sum_{i=1}^m M_n \quad (2-33)$$

Finalmente:

$$M_n = \frac{\Phi_0 * \rho^2}{A_0(1 - \rho)} \left[ \frac{\text{LUMENES}}{\text{SQFT}} \right] \quad (2-34)$$

Donde  $M_n$  es la exitancia de una parte apantallada de la esfera,  $\Phi_0$  es el flujo total de la fuente,  $A_0$  es el área de la esfera y  $\rho$  es la reflectancia. [8]

En resumen, la esfera integradora es un recinto que contiene y difunde la luz de entrada para que se distribuya uniformemente sobre toda el área de la esfera. Esta difusión ocurre por dos motivos, una superficie Lambertiana y la forma geométrica de la esfera. Esto quiere decir que la geometría de la esfera asegura que cada punto dentro de la esfera recibe la misma intensidad o luz que cualquier otra parte de la esfera.

## 2.4 Métodos existentes para el calculo de factor de reflexion con esfera integradora

### 2.4.1 Método de A.H Taylor

Este método consiste en orientar un haz de luz hacia la muestra o superficie para luego medir el valor de la iluminancia ( $E_1$ ) en la ventana. Luego el haz de luz es orientado a un punto cualquiera de la esfera para volver a medir la iluminancia ( $E_2$ ). La relación de iluminancia dará el valor de reflectancia de la muestra [8].

$$\rho_{\text{muestra}} = \frac{E_1}{E_2} \quad (2-35)$$

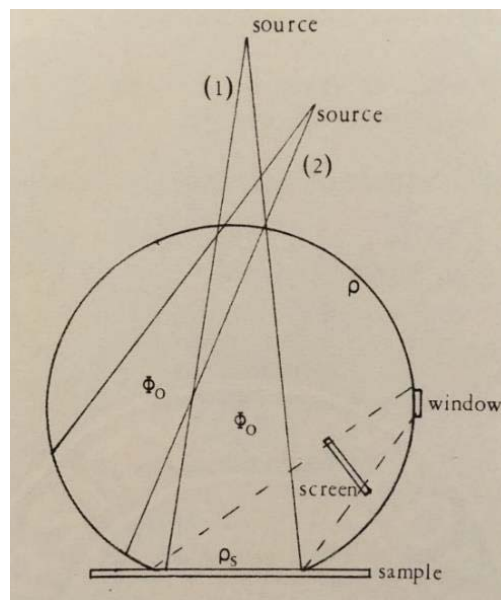


Figura 2-8: medición de la reflectancia para incidencia directa [8]

Demostración:

$$E1 = \frac{M}{\rho} \quad (2-36)$$

Donde M es la exitancia (salida radiante) de pares esférica debido al flujo reflejado,  $\rho$  reflectancia de la pared de la esfera.

De acuerdo con la teoría de la esfera (ecuación 2-34):

$$M = \frac{\Phi_0 * \rho^2}{A_0(1 - \rho)} \quad (2-37)$$

Reemplazando en ecuación 2-36:

$$E1 = \frac{\Phi_0 * \rho^2 * \rho_s}{A_0(1 - \rho)\rho} \quad (2-38)$$

$$E1 = \frac{\Phi_0 * \rho * \rho_s}{A_0(1 - \rho)} \quad (2-39)$$

Donde  $\rho_s$  es la reflectancia de la muestra, ahora el haz de luz orientado a la pared de la esfera:

$$E2 = \frac{\Phi_0 * \rho^2}{A_0(1 - \rho)\rho} \quad (2-40)$$

$$E2 = \frac{\Phi_0 * \rho}{A_0(1 - \rho)\rho} \quad (2-41)$$

Dividiendo ambas:

$$\frac{E1}{E2} = \rho_s \quad (2-42)$$

Sin embargo, al cambiar la dirección del haz como en E1, el apantallamiento provisto para E1ya no está disponible, por lo que:

$$E2 = \frac{\rho * \Phi_0 * \rho}{A_0(1 - \rho)} + E_{directo} \quad (2-43)$$

$E_{directo}$  = iluminancia en la ventana debido al flujo directo

Nuevamente, desde la teoría de la esfera. El factor de forma entre dos partes de la esfera será igual al área del receptor dividido por  $A_0$  siendo  $A_0$  el area de la esfera. Por lo tanto:

$$\Phi_{direct} = \Phi_0 * \rho * FF_{spot-window} \quad (2-44)$$

$FF_{spot-window}$ : Factor de forma desde el punto de la esfera iluminada, creado por el rayo reorientado, a la ventana de la esfera.

$$E_{direct} = \Phi_0 * \rho * FF_{spot-window} / A_{window} [\text{lumenes/sqft}] \quad (2-45)$$

Sustituyendo el valor del factor de forma

$$E_{direct} = \frac{\Phi_0 * \rho}{A_o} \quad (2-46)$$

Sustituyendo

$$E2 = \frac{\rho^2 * \Phi_0}{A_o(1 - \rho)} + \frac{\Phi_0 * \rho}{A_o} \quad (2-47)$$

$$E2 = \frac{\rho * \Phi_0}{A_o * \left(\frac{\rho}{1 - \rho} + 1\right)} \quad (2-48)$$

$$E2 = \frac{\rho * \Phi_0}{A_o * \left(\frac{\rho + a - \rho}{1 - \rho}\right)} \quad (2-49)$$

Finalmente:

$$\frac{E1}{E2} = \rho_s \quad (2-50)$$

Este método es consistente para el proyecto, ya que se comprobó que, al direccionar el flujo de luz, tanto como a la muestra y a un punto cualquier de la pared de la esfera, la iluminancia a medir en ambos casos dependerá del índice de reflexión donde este direccionado el flujo de luz, ya que el flujo y el área de la esfera se mantienen constantes. La relación de iluminancia de cómo resultado el factor de reflexión de la muestra. Además, una esfera de integración puede ser manipulada por una persona si se consiguen las dimensiones adecuada para su facilitar su uso como instrumento. El instrumento necesario para medir la iluminancia E1 Y E2 en este caso es el luxómetro.

#### 2.4.2 Método de C.H. Sharp y W.F. Little

Este método consiste en enviar un haz de luz concentrado a la superficie interna de la esfera, produciendo un punto luminoso dentro de ella, por otra parte, se utiliza un puerto donde va la muestra que se desea medir, el cual esta tapado por una pantalla, con el fin de que la muestra solo reciba el flujo reflejado dentro de la esfera. La reflectancia o factor de reflexión de la muestra se determina por la relación de la luminancia de la muestra por la luminancia de la pared de la esfera (ecuación 2-51)

$$\rho_{muestra} = \frac{L_{muestra}}{L_{esfera}} \quad (2-51)$$

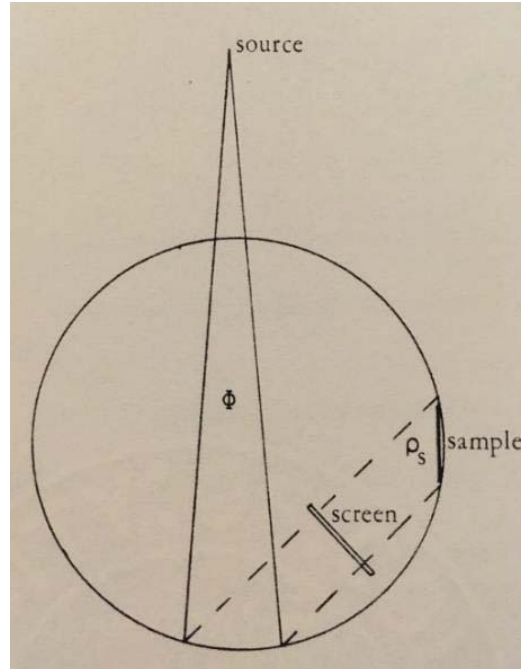


Figura 2-9: Medición de reflectancia para incidencia difusa [8]

Este método entregará la reflectancia para materiales especulares, porque la luminancia de la muestra corresponderá a la luminancia de la esfera multiplicada por el factor de reflexión de la muestra. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la luz incidente proviene de todas las direcciones y no se permite ninguna incidencia (reflectancia bihemisférica). Sharp y Little afirman en su trabajo que el procedimiento también es válido para superficies comunes (combinación de especulares y difusos). Para este tipo de superficies la luminancia no es más constante, pero depende del ángulo que alcanza la superficie [8].

$$\rho_{\text{muestra}} = \frac{I(\theta)}{\Phi_{\text{muestra}} \cos(\theta)} \quad (2-52)$$

El factor de reflexión no es dimensional y depende de la intensidad de la luz que llega a la superficie y del ángulo de incidencia. Por lo tanto, el método no es consistente para el proyecto.

### 2.4.3 Método para determinar la reflectancia direccional

El método consiste en enviar un haz de flujo estrecho hacia la superficie y medir la luminancia de esa superficie. Considerando dos condiciones:

- Se conoce la magnitud de la intensidad de la fuente y el ángulo de incidencia con la superficie.
- La luminancia superficial se mide con un ángulo determinado con respecto a la superficie normal.



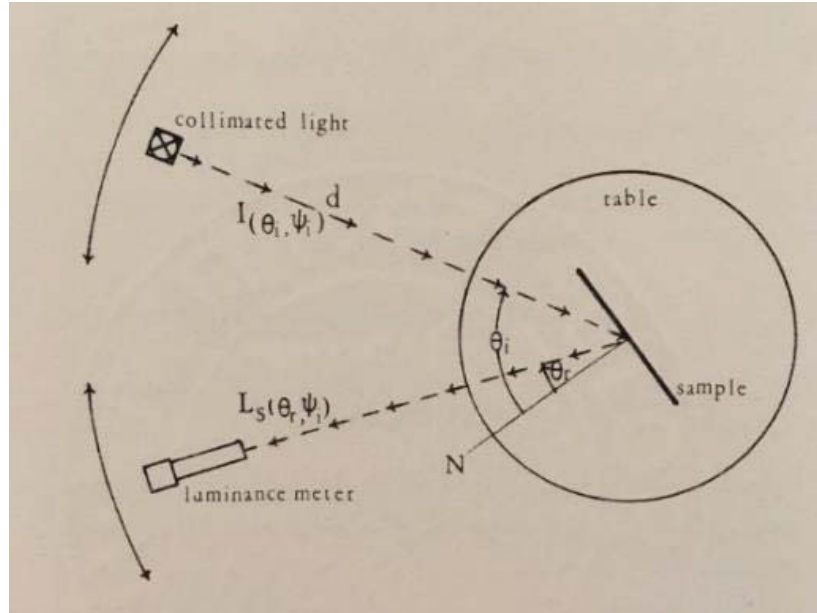


Figura 2-10: Reflectancia direccional [8]

El factor de reflectancia está en función del ángulo incidente y el ángulo de medición,  $\Theta_i$  y  $\Theta_r$  respectivamente. El flujo incidente y el ángulo de medición pueden estar dispuestos en diferentes planos, en cuyo caso el factor de reflectancia también será una función relativa de estos planos.

Este método queda descartado para el proyecto, ya que se aplica para el caso de superficies especulares, además la muestra está dentro de la esfera de integración, por ende, no es válido, ya que no es viable en este tipo de proyectos desprender un trozo de superficie.

## 3 Desarrollo

En el presente capítulo se profundiza el método de A.H. Taylor, describiendo la teoría planteada por el ingeniero, los detalles de construcción y las conclusiones a las que llegó. Luego se plantea el reconocimiento y clasificación de las superficies en las cuales se puede utilizar el método de Taylor enfocado en el proyecto.

### 3.1 Instrumento del proyecto

El método de A.H. Taylor será considerado para la elaboración del instrumento que permita medir el factor de reflexión en interiores. Para esto es necesario una esfera de integración de 20 centímetros de diámetro, el cual tenga tres aberturas; un luxómetro para medir las iluminancias, una luminaria pequeña del cual será seleccionada al momento de tener la esfera integradora.

Una de las aberturas de la esfera será utilizada para medir la muestra, en el borde de este orificio se insertará algún tipo de esponja, con la finalidad de que las mediciones no se vean alteradas por agentes externos, en el caso de que la superficie presenta muchas irregularidades.

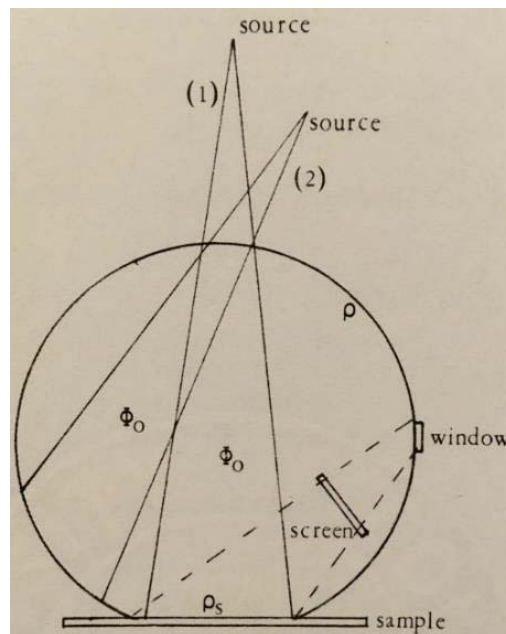


Figura 3-1: Prototipo del instrumento según método de A. H. Taylor [8]

## 3.2 A.H. Taylor

Albert Hoyt Taylor ingeniero eléctrico estadounidense, (1 de enero de 1879 – 11 de diciembre 1961) realizó importantes contribuciones tempranas al desarrollo del radar. En su carrera se destacó como director de comunicaciones navales, superintendente de comunicaciones para luego convertirse en jefe de laboratorio de radio aeronáutica en la estación naval Anacostia, Washington DC. En el año 1929 fue presidente del instituto de ingenieros de radio (IRE) y de 1936 a 1942 formó parte del comité de comunicaciones del instituto americano de ingenieros eléctricos. Ambas organizaciones fueron predecesoras de lo que ahora es la IEEE.

En 1920 publicó un artículo llamado “a simple portable instrument for measuring reflection and transmission factors in absolute units” A continuación se describe la teoría propuesta por Taylor como los detalles de construcción del instrumento.

### 3.2.1 Teoría del reflectómetro

Si se proyecta luz sobre la pared interna de una pequeña esfera hueca, pintada de blanco que refleja difusamente, se puede demostrar que la iluminación de la superficie con luz reflejada solo será igual en intensidad en todos los puntos.

Una pequeña esfera hueca como se muestra en la figura 3-3 se corta un pequeño segmento de la superficie, dejando un orificio sobre el cual se coloca la superficie que se va a probar. En otro punto de la esfera, a unos 90° de este, hay un pequeño orificio a través del cual se ve la pared opuesta de la esfera por medio de un fotómetro portátil. El punto visto se proyecta desde la superficie de prueba por medio de una pequeña pantalla opaca. En la figura 3-2 se muestra la forma de utilización de esta.

Sea:  $F$  = flujo de luz total (lúmenes) que ingresa a la esfera.  $m$  = factor de reflexión de la superficie de la esfera.  $m'$  = factor de reflexión de la superficie de prueba.  $E'$  = iluminación del punto de observación cuando la luz directa se proyecta sobre la superficie de prueba.  $E$  = iluminación del punto de observación cuando la luz directa se proyecta sobre la superficie de la esfera en un punto no apantallado desde el punto de observación.

Cuando la luz se proyecta sobre la superficie de prueba, debe reflejarse desde ella y desde la pared de la esfera una vez antes de que cualquier de ellos alcance el punto de observación, ya que este punto se oculta desde la superficie de prueba. Por lo tanto, el flujo que es efectivo para iluminar el lugar observado es  $m'mF$  lúmenes. Cuando el rayo incidente se proyecta sobre la superficie de la esfera en un punto no apantallado del lugar observado, se puede ver fácilmente, por el mismo método de razonamiento, que su efecto en el punto de observación es el mismo que el de una fuente puntual que irradia  $mF$  lúmenes. Por lo tanto, en cada caso, la iluminación del punto es directamente proporcional a estos valores de flujo, y la relación de la iluminación en los dos casos es el factor de reflexión de la superficie de prueba. Por lo tanto:

$$\frac{E'}{E} = \frac{m'mF}{mF} = m' \quad (3-1)$$

Debe notarse aquí que no se ha asumido ninguna suposición con respecto a la forma en que el flujo de luz se refleja desde la superficie de prueba. Por lo tanto, el factor de reflexión de la superficie de prueba se evaluará correctamente, independiente de cómo se distribuya el flujo de la superficie de prueba sobre la pared de la esfera. Además, el factor de reflexión medido es el factor de la luz del color emitido por la lampara y no se ve afectado por la reflexión selectiva por las paredes de la esfera.



Figura 3-2: Método de utilización del instrumento para medir el factor de reflexión de una pared

### 3.2.2 Detalles de construcción

Los detalles del instrumento construido se muestran en la figura 3-3. La esfera hueca utilizada por Taylor es una bola de cobre hilada, de 5 pulgadas (12.7 cm) de diámetro, tal como la que se usa con las válvulas de flotación de vapor. El tubo de iluminación, que se fija en un ángulo con respecto a la superficie de la esfera, se puede girar alrededor de un eje normal a la superficie de la esfera. Esto permite que la luz directa sea direccionada sobre la superficie de prueba o a la pared de la esfera como se desee, siendo el ángulo de incidencia de aproximadamente  $40^\circ$  con respecto

a la normal. Por medio de un buen sistema de lentes se obtiene un estrecho haz de luz, sin luz dispersa. Esto da como resultados una mancha de luz bastante uniforme y bien definida de aproximadamente 2 cm de diámetro, de modo que la abertura sobre la que se coloca la superficie de prueba no necesita ser muy grande. En el tubo se usa una lampara de luz flash opal de 2,8 voltios.

El instrumento utilizado en las pruebas fue diseñado y construido para ser utilizado con un iluminómetro Macbeth. Un lente de 61 mm de distancia focal insertada en el tubo acodado del iluminómetro restringe la mancha observada a un diámetro aproximadamente de 4 mm, por lo tanto, se puede usar una pantalla muy pequeña para filtrar estas manchas desde la superficie de prueba.

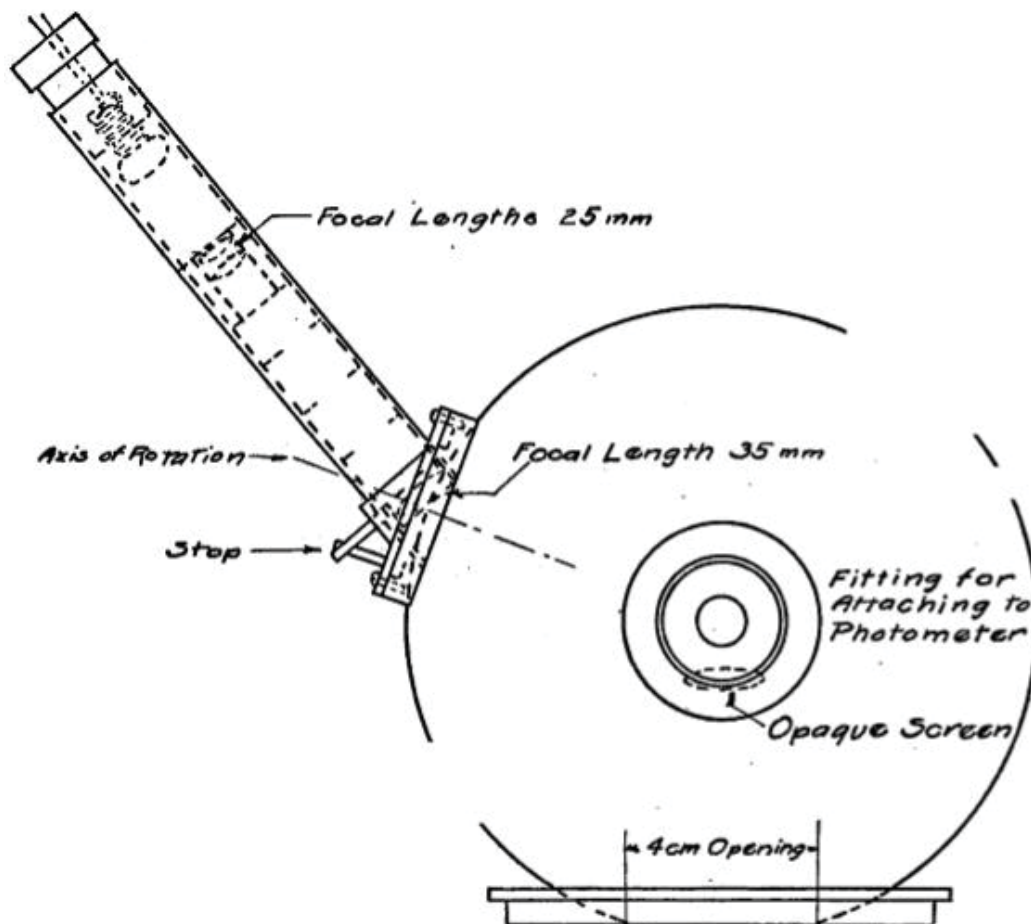


Figura 3-3: Boceto del instrumento sin fotómetro

### 3.2.3 Conclusiones de Taylor

Solo se ha demostrado una adaptación del principio de este instrumento, pero no hay ninguna razón por la cual no podría adaptarse para su uso con casi cualquier tipo de fotómetro portátil. Hay una ventaja considerable al usar un instrumento de este tipo en lugar de un instrumento que proporciona valores relativos, ya que no se requiere una superficie estándar, y no es necesario que las lámparas o las superficies de la esfera permanezcan constantes.

El uso de una lámpara de bajo voltaje en el tubo de iluminación hace que el instrumento sea conveniente y fácil de transportar. Una mejora adicional en lo que respecta a la portabilidad sería eliminar el conjunto de medidores de batería y sustituirla por una batería de tres celdas y resistencias en miniatura.

El uso del instrumento para medir tanto el factor de reflexión como los de transmisión duplica su utilidad. No se ha propuesto ningún otro instrumento que tenga este valor dual.

Este instrumento demuestra que el alto valor del factor de reflexión del carbonato de magnesio, y establece el valor del 99% para un bloque en particular.

### 3.3 Clasificación según el tipo de superficie

El estudio y reconocimiento de los materiales que forman parte del lugar es de gran importancia, se debe reconocer los diferentes tipos de superficies presentes ya sean especulare, difusas o mixtas, ya que el instrumento se utilizara especialmente en superficies difusas y mixtas. En el caso de superficies especulares como cerámicas y paredes que contengan pintura de alto brillo como el esmalte sintético, barniz, para estos casos se pretende utilizar el medidor de especularidad o brillómetro.

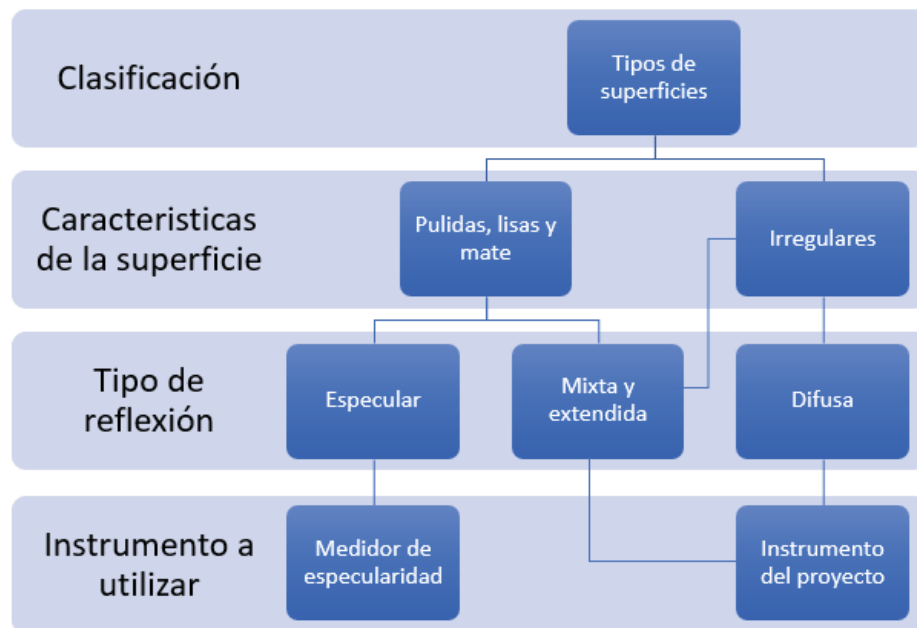


Figura 3-4: Mapa conceptual clasificación según tipo de superficie

## 4 Instrumento del proyecto

En el siguiente capítulo se describen las características que tendrá el instrumento capaz de medir el factor de reflexión de superficies en interiores, los materiales a utilizar para su fabricación como las observaciones importantes que se deben tener en cuenta para cumplir con la metodología estudiada en los capítulos anteriores, además se describe el funcionamiento de instrumento.

### 4.1 Materiales a utilizar

Los materiales son los siguientes:

- Esfera de aluminio hueca
- recubrimiento reflectante (sulfato de Bario)
- Un luxómetro con corrector coseno
- Un LED
- Batería
- Tubo de aluminio
- Bisagras
- Juego de lentes

### 4.2 Fabricación

Como ya se mencionó en los capítulos anteriores, la esfera hueca de aluminio tendrá una dimensión 20 centímetros de diámetro, con esto se consigue que la esfera pueda ser manipulada por una persona, ya que si las dimensiones fueran mayores el peso aumentaría y dificultaría al momento de medir el factor de reflexión en superficies de difícil acceso como las esquinas o rincones de un recinto.

Esta esfera tendrá un corte por la mitad, la cual estará sujeta por una bisagra, con el fin de poder manipular el interior de la esfera, además tendrá un seguro en su otro extremo para cerrar la esfera. Internamente la pared estará recubierta por sulfato de bario ( $\text{BaSO}_4$ ) ya que este material presenta una alta reflectancia cercana al 97%. recordando la teoría de la esfera integradora, los orificios o puertos no podrán exceder el 5% del área total de la esfera. Esta tendrá 3 orificios cuyas dimensiones son las siguientes.

Área total de la esfera

$$A = 4\pi r^2 \quad (4-1)$$

El área total de la esfera es de  $1256,63 \text{ cm}^2$  por lo tanto los puertos no pueden exceder el 5% de este, que serían  $62,83 \text{ cm}^2$ .

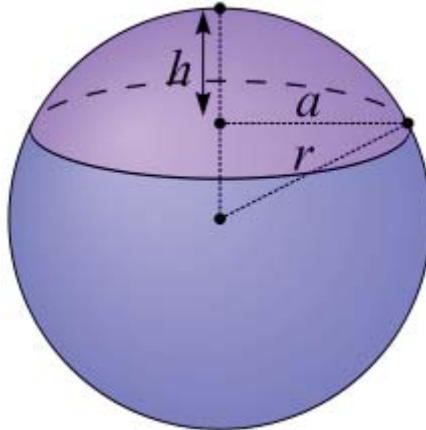


Figura 4-1: Casquete esférico

Área de un casquete esférico

$$A = 4\pi r h \quad (4-2)$$

Donde  $h$  es la altura del casquete y  $a$  es el radio de la base del casquete.

Para el puerto de la muestra el corte será de  $4 \text{ cm}$ , entonces  $a = 2 \text{ cm}$  y  $h = 0,2020 \text{ cm}$  por lo tanto el área del puerto es de  $12,69 \text{ cm}^2$ .

Para el puerto de la fuente de luz tendrá un corte de  $3 \text{ cm}$ , entonces  $a = 1,5 \text{ cm}$  y  $h = 0,1131 \text{ cm}$  por lo tanto el área del puerto es de  $7,108 \text{ cm}^2$ .

Para el puerto del instrumento el corte será de  $5 \text{ cm}$ , entonces  $a = 2,5 \text{ cm}$  y  $h = 0,3175 \text{ cm}$  por lo tanto el área del puerto es de  $19,951 \text{ cm}^2$ .

La suma de las tres áreas de cómo resultado  $39,75 \text{ cm}^2$  lo cual es menor al 5% del área total. Como observación estas áreas pueden ir variando al momento de la construcción del instrumento y pueden ser modificadas siempre y cuando no se exceda el 5% del área total de la esfera.

En resumen:

- Puerto 1 (muestra) =  $4 \text{ cm}$  de corte
- Puerto 2 (entrada de fuente de luz LED) =  $3 \text{ cm}$  de corte
- Puerto 3 (luxómetro) =  $5 \text{ cm}$  de corte

Dentro del tubo de aluminio estará instalada la luz led con su respectiva alimentación (batería), este tubo tendrá un extremo sellado y el otro extremo que va al puerto tendrá un lente focal cuyo



objetivo es poder concentrar la mancha de luz para poder ser guiada a la muestra y a la pared de la esfera, esta mancha no podrá exceder las dimensiones del puerto de la muestra, ya que si fuera así las mediciones del instrumento serian erróneas. Este tubo al ser colocado en la esfera debe tener un tipo de brazo mecánico con un vástago que tiene como objetivo darle la dirección a la mancha de luz, tanto como a la muestra y a la pared interna de la esfera. Este brazo se podrá inclinar en  $30^\circ$ .

El puerto donde va el instrumento de medición estará ubicado a  $90^\circ$  con respecto al puerto de la muestra, como observación, las dimensiones de este puerto pueden ir variando dependiendo del sensor del instrumento, pero lo idea es que este sensor no exceda las dimensiones ya mencionadas. Este puerto tendrá un tipo de pantalla ubicada en el interior de la esfera recubierta con el mismo material que la pared interna de esta, el objetivo de esto es que al sensor solo mida la iluminancia obtenida por las múltiples reflexiones que ocurren en el interior de la esfera y la reflexión directa desde la misma muestra.

El instrumento por utilizar es un luxómetro, para lograr mediciones con precisión el fotosensor debe tener la característica de corrección coseno, el cual tiene en cuenta los efectos de la luz cayendo sobre la célula a ángulos oblicuos.

En las siguientes figuras se representan esquemas del instrumento, con visualizaciones de la estructura, realistas y realista con corte. El puerto donde va la luz led con su respectiva fuente de alimentación está representado por el tubo el cual sobresale de la esfera, este puede ir variando en el largo dependiendo de los elementos a utilizar como también el juego de lentes que van en su interior. A un costado de la esfera estará el luxómetro, el cual está representado por un cuadrado en su respectivo puerto; el rectángulo interno representa la pantalla que estará ubicada debajo del luxómetro y finalmente el puerto de muestra está representada por el orificio inferior.

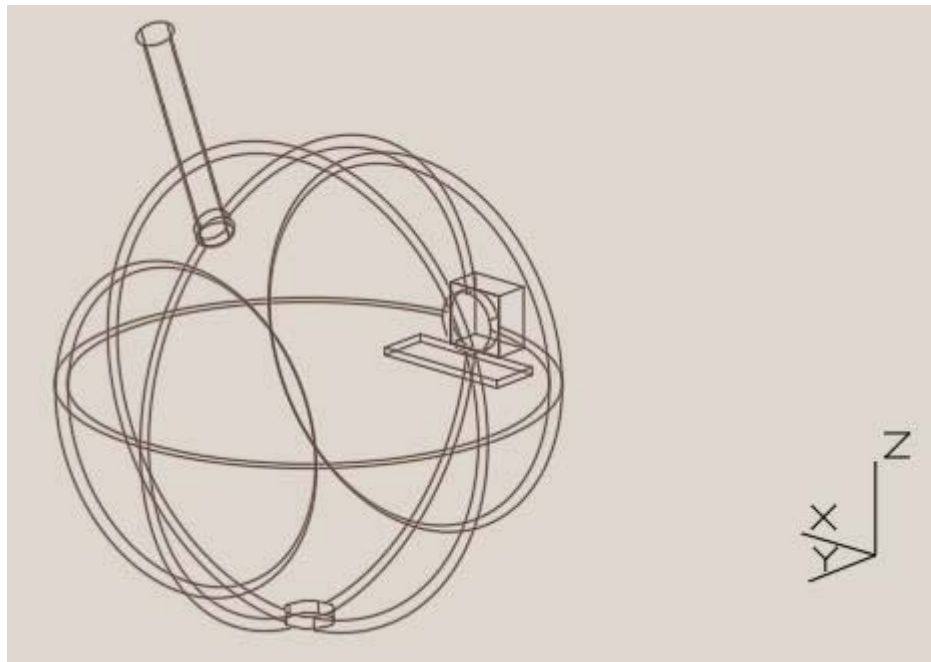


Figura 4-2: Esquema del instrumento (visualización estructural)

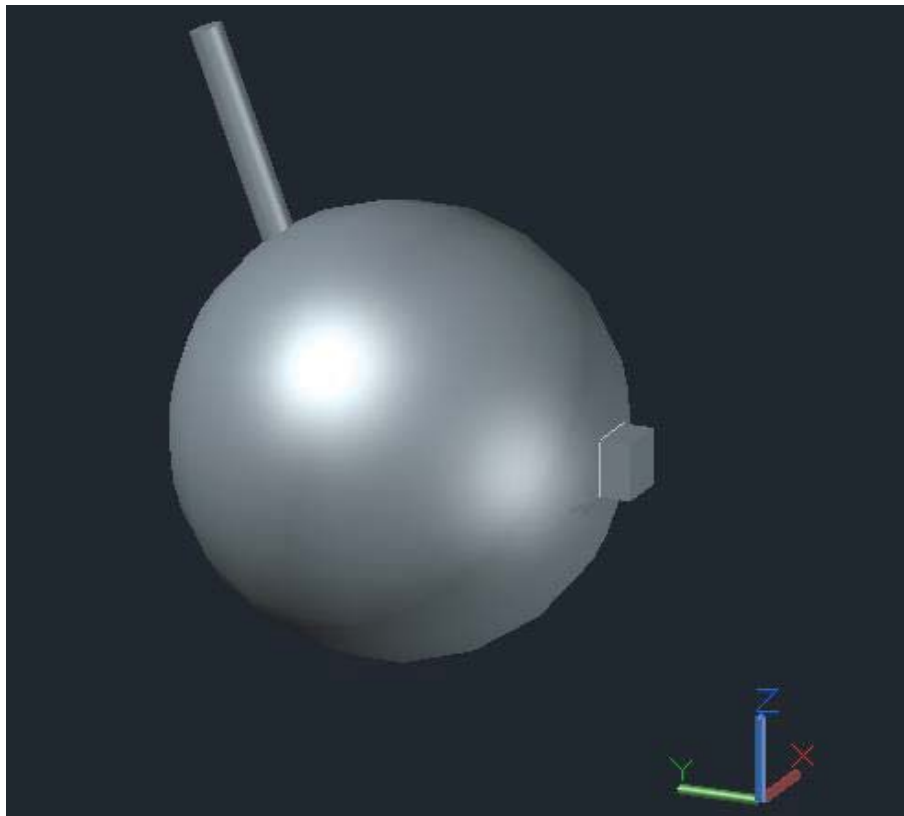


Figura 4-3: esquema instrumento visualización realista

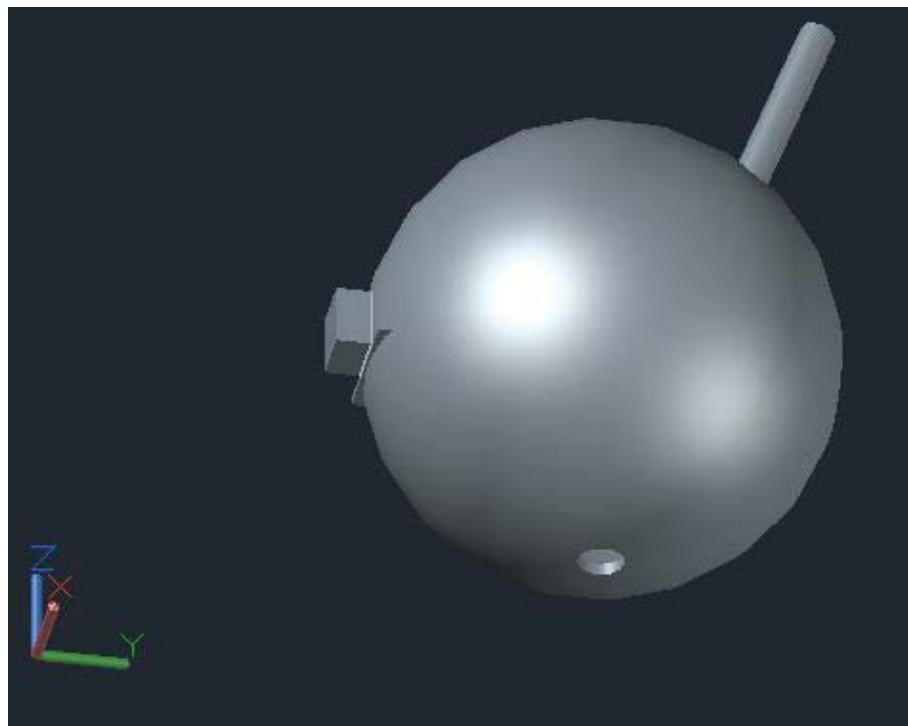


Figura 4-4: Visualización del instrumento (visto desde abajo)



Figura 4-5: visualización del instrumento (cortado verticalmente)

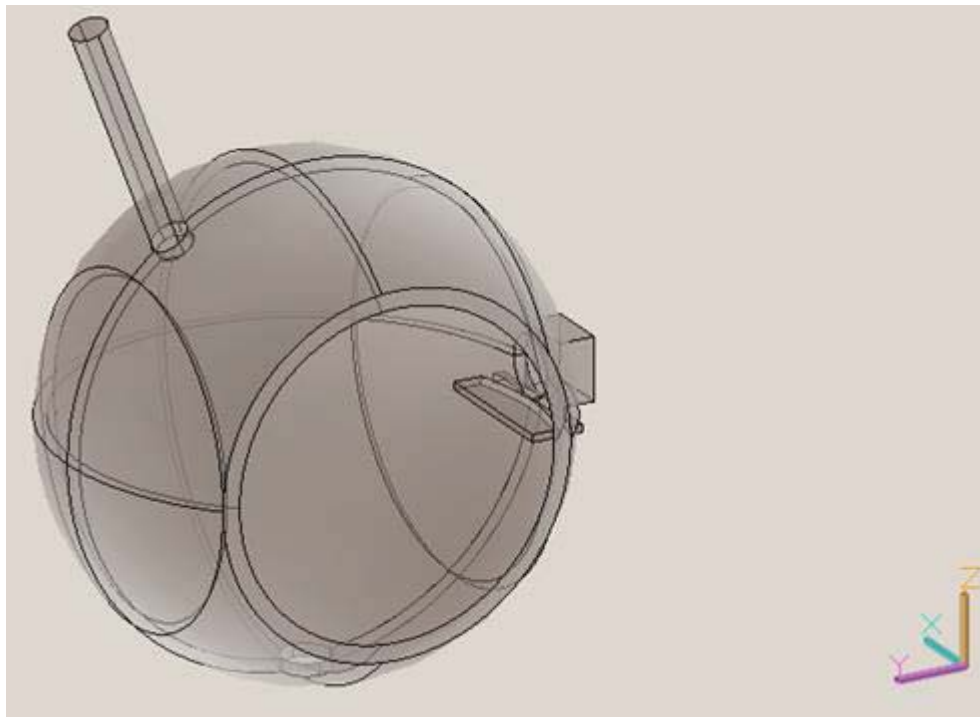


Figura 4-6: esquema del instrumento (visualización rayos x)

### 4.3 Funcionamiento del instrumento

Utilizando el método de la esfera de integración y el método del reflectómetro desarrollado por el ingeniero Taylor, el funcionamiento del instrumento se describe en los siguientes pasos.

En primer lugar, es necesario utilizar como muestra una parte de la superficie del recinto donde el instrumento se adapte sin problemas y donde su uso sea cómodo para el usuario.

Al momento de ubicar el puerto de muestra en la superficie, se debe manipular el tubo de aluminio con el fin de direccionar el haz de luz a la muestra, teniendo en cuenta que el led estará apagado.

Una vez realizado el paso anterior se procede a encender el led, haciendo que la luz se proyecte sobre la muestra, la reflexión del flujo luminoso ocurre desde la muestra a las paredes internas de la esfera, provocando múltiples reflexiones, este flujo luminoso contiene el índice de reflexión de la muestra con el índice de reflexión de la pared de la esfera.

Luego se debe medir la iluminancia en el luxómetro ubicado en el puerto de instrumento, cabe destacar que la pantalla interna de la esfera tiene como fin evitar que la luz reflejada por la muestra incida directamente sobre el instrumento, en otras palabras, el instrumento solo recibirá el flujo interreflejado por la superficie interna de la esfera. La iluminancia medida en este punto se le llamará E1.

A continuación, se vuelve a manipular el tubo de aluminio del led para direccionar el flujo de luz a un punto cualquiera de la pared interna de la esfera, provocando ahora que la reflexión del flujo luminoso se origina en la pared de la esfera, provocando múltiples reflexiones hasta conseguir el índice de reflexión de la pared interna en cualquier punto de esta. Como observación la muestra se comporta como parte de la esfera. Luego se vuelve a medir la iluminancia con el luxómetro, el cual se llamará E2.

Como se demostró en el método de A.H. Taylor, la relación de iluminancia dará como resultado el factor de reflexión de la muestra.

$$\rho \text{ muestra} = \frac{E1}{E2} \quad (4-3)$$

Es recomendable al momento de hacer las mediciones, utilizar varios puntos a medir en la superficie del recinto, con el fin de obtener un promedio, ya que la superficie puede verse afectada por varios motivos como suciedad o desgaste por temperatura u otro factor.

A continuación, para resumir el funcionamiento se muestra en un esquema los pasos a seguir para determinar el factor de reflexión con el instrumento del proyecto.



Figura 4-7: Esquema de pasos

Es importante considerar que el orificio donde va la muestra, este bien sujeta a la misma, ya que factores externos como flujo luminoso de fuentes externas pueden altera la medición del factor de reflexión. Además, es importante al momento de medir la iluminancia en los pasos 2 y 3, asegurarse de que el flujo luminoso este totalmente direccionado a la muestra o a la pared interna de la esfera, para que las mediciones sean exactas.

## Discusión y conclusiones

Con el desarrollo de este trabajo, es importante entender los conceptos básicos y los principales tópicos del trabajo a desarrollar. Entre los conceptos básicos (flujo luminoso, intensidad luminosa, luminancia e iluminancia), el diseño de iluminación en interiores (método de los lúmenes y punto por punto) siendo el método de los lúmenes fácil y sencillo de utilizar.

Se pudo comprender el concepto de reflexión de la luz, de cual existen cuatro tipos de reflexión (especular, difusa, extendida y mixta) estas se clasifican según las características que tenga la superficie. El factor o índice de reflexión es un concepto que se debe tomar en cuenta al momento de diseñar o rediseñar proyectos de luminarias de recintos interiores, ya que el dominio de estos valores hace posible tener una idea del comportamiento de las luminarias que se pretenden utilizar dentro del recinto, con la finalidad de optimizar y aprovechar el flujo luminoso reflejado por las diferentes superficies que forman parte de un recinto. El factor o índice de reflexión va variando según el material y color que forma parte de la superficie, estos valores actualmente son aproximados al momento de utilizar software o programas de simulación. Otros factores que alteran el índice de reflexión son la suciedad y desgaste del material por el tiempo o temperatura, los cuales son considerados en el factor de mantenimiento.

Dentro de los métodos utilizados para el diseño de luminarias de interiores se encuentra el método de las cavidades zonales, este método consiste en un conjunto de pasos a seguir considerando las dimensiones del local como la iluminancia media exigida por la normativa chilena vigente. Dentro del método se utiliza el factor de utilización, el cual tiene una gran importancia dentro del proyecto ya que en este se consideran los factores de reflexión de las diferentes superficies que forman parte del recinto. Este factor de utilización está ligado a la transferencia de flujo.

El medidor de specularidad es un instrumento utilizado actualmente para el control de la calidad de productos como en industrias de automotriz y plásticos. Este instrumento puede ser utilizado al momento de medir el factor de reflexión de superficies que presentan una reflexión especular, superficies presenten un alto nivel de brillo, como en el caso de superficies pintadas con esmalte sintéticos, barniz, cerámicas, etc.

Las propiedades de difusión y reflexión que produce la intensidad de luz hacen de la esfera de integración una herramienta útil para las fuentes de luz de prueba, como láser u otras luces, y la

determinación de una gran cantidad de información acerca de su energía total, la intensidad y la eficiencia. Una esfera de integración también es útil para los materiales de muestra de prueba.

En el caso del proyecto la esfera de integración es de gran importancia, ya que al estar recubierta de un material altamente reflectante representa una reflectividad lo más uniforme posible a diferentes longitudes de onda percibidas por el ojo humano. Se asume que la esfera integrado es una superficie lambertiana con reflectancia no selectiva, es decir que para cualquier longitud de onda del espectro visible se tiene el mismo índice de reflectancia en todos los puntos de la esfera, además por la geometría de la esfera y por el hecho de que la luz no incide directamente en el sensor de medición, no existen puntos privilegiados en su superficie interior. Con estas condiciones y asumiendo la fuente luminosa como puntual frente a la esfera, se puede probar que el flujo luminoso es proporcional a la intensidad luminosa.

Dentro de los tres métodos utilizados para medir el factor de reflexión con la esfera de integración, el más conveniente para el proyecto es el de A.H. Taylor, ya que este se puede utilizar en superficies que presentes reflexión difusa. Para el caso del método de C.H. Sharp y W.F. Little la reflectancia se ve alterado dependiendo por la intensidad de la luz y del ángulo de incidencia. Por otro lado, el método para determinar reflectancia direccional no es considerado por el hecho de que la muestra está dentro de la esfera de integración.

El método de A.H. Taylor consiste en direccionar una mancha de luz dentro de una esfera integradora hacia dos puntos, una de ellas es la muestra y la otra es un punto cualquiera de la esfera, en un puerto de este, estará un instrumento midiendo la iluminancia de ambos casos. Cuando la luz es direccionada a la muestra, esta se refleja desde la muestra a las paredes de la esfera, esta reflexión ocurre múltiples veces hasta llegar al punto de que en cualquier área de la esfera tendrá la misma iluminancia, el instrumento medirá dicha iluminancia. En el caso de que la luz sea direccionada a un punto cualquiera de la esfera ocurre lo anterior ya dicho. La relación de ambas iluminancias da como resultado el factor de reflexión de la muestra. El reflectómetro de Taylor tenía la desventaja de que la lampara de 2,8 volt necesitaba una batería en aquel tiempo bastante grande, además la esfera estaba construida de cobre, haciéndola pesada y difícil de utilizar.

El reconocimiento de las diferentes superficies que forman parte de un recinto interior es importante, ya que permite saber que instrumento es necesario de utilizar para medir la reflectancia. Para el caso del proyecto el instrumento estará enfocado en superficies que presenten reflexión difusa, extendida y mixta, para el caso de la reflexión especular se puede utilizar el medidor de especularidad.

Es necesario tomar en cuenta las características que debe tener la esfera de integración para que esta funcione como tal según la teoría, los puertos u orificios no deben exceder el 5% del área total de la esfera, los valores descritos en la fabricación pueden ir variando ya que fueron consideradas como una aproximación, estas pueden variar siempre cuando se cumpla con lo anterior dicho. El recubrimiento de la pared debe estar recubierta por sulfato de bario ( $BaSO_4$ ) que presenta una gran reflectividad o puede ser reemplazada por otra pintura que cumpla el mismo objetivo. El

luxómetro para utilizar debe tener como característica el corrector de coseno, ya que este instrumento tiene en cuenta los efectos de la luz que caen sobre la célula los ángulos oblicuos.

Es importante considerar al momento de fabricar el instrumento que el tubo de aluminio donde va el led tenga un juego de lentes con el fin de concentrar el haz de luz, esto es relevante para que los cálculos sean óptimos, ya que es necesario que este haz de luz al ser direccionado a la muestra sea menor al corte del puerto de muestra. En caso contrario las mediciones serán erróneas.

Finalmente, la importancia que tiene este instrumento es que puede ser utilizado al momento de diseñar y rediseñar proyectos de iluminación de interiores, ya que al tener el valor exacto del factor de reflexión de las diferentes superficies in situ que forman parte de un recinto, hace que las simulaciones y cálculos sean los óptimos al momento de elegir las luminarias que formaran parte del proyecto. Con esto se utiliza de mejor forma la propiedad de reflexión de las superficies.



# Bibliografía

- [1] «Quiminet,» 12 septiembre 2011. [En línea]. Available: <https://www.quiminet.com/articulos/el-luxometro-la-mejor-opcion-para-controlar-los-niveles-de-iluminacion-en-la-industria-2575351.htm>.
- [2] Airfal , «Airfal Internacion,» [En línea]. Available: <http://www.airfal.com/programa-calculo-iluminacion-dialux/>.
- [3] Strasse, Lausitzer, «BYK,» [En línea]. Available: [http://www.byk.com/fileadmin/byk/support/instruments/theory/appearance/es/Intro\\_Brillo.pdf](http://www.byk.com/fileadmin/byk/support/instruments/theory/appearance/es/Intro_Brillo.pdf).
- [4] limited, elcometer, «elcometer,» [En línea]. Available: <http://www.elcometer.com/en/how-to-measure-gloss-using-a-gloss-meter.html>.
- [5] «prucomercialre.com,» 24 12 2010. [En línea]. Available: <http://www.prucomercialre.com/que-es-una-esfera-de-integracion/>.
- [6] Raitelli, Mario, «Diseño De Iluminacion De Interiores».
- [7] Castilla Cabanes, Nuria; Blanca Gimenez, Vicente; Martínez Antón, Alicia; Pastor Villa, Rosa María, «LUMINOTECNIA: cálculo según el método de los lúmenes,» E.T.S Arquitectura, [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12833/art%C3%ADculo%20docente%20C%C3%A1lculo%20m%C3%A9todo%20de%20los%20l%C3%BAmenes.pdf>.
- [8] Piraino, Enrique, «the luminaire reflector reflectance in the fixture efficiency,» 1985.