



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA – MECATRÓNICA

METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS EN  
MATERIALES USADOS EN LAS ARTES GRÁFICAS

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
JOSÉ FRANCISCO REVUELTA MEZA

TUTOR PRINCIPAL  
DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F., OCTUBRE 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Marcelo López Parra  
Secretario: Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich  
Vocal: Dr. Vicente Borja Ramírez  
1<sup>er</sup> Suplente: Dr. Adrián Espinosa Bautista  
2<sup>do</sup> Suplente: Dra. María del Pilar Corona Lira

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, México D.F.

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Vicente Borja Ramírez

-----  
**FIRMA**

## Índice

Prólogo	1
Resumen	2
1. Introducción	3
1.1 Estructura de la tesis	4
2. Definición del problema	6
3. Objetivo de la tesis	7
3.1 Metodología	7
4. Antecedentes	8
4.1 Luz	8
4.1.1 Interacción de la luz con los materiales	9
4.1.2 Reflexión	10
4.2 Color	10
4.2.1 Coloración aditiva	12
4.2.2 Coloración substractiva	12
4.2.3 CIELAB	13
4.3 Conceptos básicos de las imprentas e industria del papel	14
4.4 Inferencia estadística	16
4.4.1 Distribución normal	16
4.4.2 Estimación de muestras grandes	16
4.5 Glosario de conceptos de introducción	18
5. Desarrollo del concepto del producto	21
5.1 Investigación de mercado	22
5.2 Primera recopilación de información	24
5.2.1 Estudio de mercado	25
5.2.2 Tecnología existente	25
5.3 Segunda recopilación de información	26
5.4 Conclusiones	28
5.5 Concepto del producto	29
6. Pruebas preliminares	30
6.1 Pruebas con papel, tinta y <i>primer</i>	30
6.2 Espectrofotómetro	31
6.2.1 Especificaciones del espectrofotómetro	31
6.2.2 Iluminante	32

6.3	Pruebas con espectrofotómetro	32
6.3.1	Principio de funcionamiento	34
6.4	Pruebas con sensores industriales	34
6.4.1	Investigación de mercado	34
6.4.2	Pruebas	35
6.4.3	Conclusiones	36
7.	Diseño de experimentos	37
7.1	Identificación y exposición del problema	37
7.2	Primer experimento: Aplicación de primer al sustrato	38
7.3	Segundo experimento: Medición de la reflexión de luz	39
7.4	Banco de pruebas	40
7.5	Tercer experimento: Medición con el sustrato en movimiento	41
7.6	Conclusiones	41
8.	Realización de experimentos	42
8.1	Sustratos	42
8.2	Diseño del experimento	43
8.2.1	Inferencia estadística	44
8.3	Resultado de los experimentos con base de estireno, de noche	45
8.3.1	BOPP blanco	45
8.3.2	BOPP metalizado	49
8.3.3	Estate Label	52
8.3.4	Conclusiones	56
8.4	Experimentos de BOPP Blanco con base de estireno, de noche, $n=300$	57
8.4.1	Resultado del experimento – Primera iteración	58
8.4.2	Resultado del experimento – Segunda iteración	60
8.4.3	Conclusiones	61
8.5	Experimentos de BOPP blanco con base de vinil blanco en cuarto oscuro	63
8.5.1	Base	64
8.5.2	Resultados del experimento	65
8.5.3	Conclusiones	67
9.	Conclusiones	68
	Referencias	69
	Anexos	71

## **Prólogo**

Durante un año trabajé como ingeniero de servicio en una empresa distribuidora de maquinaria para las artes gráficas. Mi área de especialización fue la de las máquinas relacionadas con la impresión de *offset* digital.

Cuando se trabaja como ingeniero de servicio, uno pasa la mayor parte del tiempo en campo, atendiendo a los clientes. Al estar con los clientes, en este caso imprentas, noté que todos tenían problemas con el mismo proceso previo a la impresión, la aplicación del *primer* en el sustrato. El problema se hacía notorio después de imprimir, al hacer pruebas de adhesión de tinta al sustrato. Algunas veces era suficiente pasar la uña encima de la impresión para que la tinta se despegara.

Al conocer a fondo las máquinas y los procesos del *offset* digital, nació la idea de ingresar al Posgrado de Ingeniería y desarrollar una máquina para procesos previos y posteriores a la impresión, incluyendo la aplicación del *primer*.

La idea evolucionó hasta llegar a los objetivos de esta tesis y su alcance final, un *sistema de calidad para la aplicación de primer al sustrato usando reflexión de luz difusa*, expuestos en esta tesis.

## Resumen

El proyecto nació de la experiencia laboral en la industria de las artes gráficas. En un trabajo de campo, se identificó un nicho especializado, en el que todas las empresas tenían los mismos inconvenientes.

La problemática de la tesis es que la aplicación del *primer* falla constantemente. Para las imprentas, sus industrias conexas y la industria del papel, que trabajan con *offset* digital, esta problemática se traduce como pérdidas en las ganancias finales.

Después de hacer estudios de mercado e investigaciones de tecnologías existentes, se aterrizó el concepto de la tesis y el de los alcances del proyecto. El objetivo de la tesis es encontrar una metodología experimental para poder medir la diferencia entre el sustrato aplicado con *primer* y el sustrato sin *primer*. El alcance del proyecto es diseñar un producto que pueda medir en línea y en todo momento la aplicación de *primer*, que ayude al usuario a poder corregir el proceso en el momento de la aplicación del *primer* al sustrato y minimizar las pérdidas. Este producto sería una innovación tecnológica, ya que no existe solución similar en el mercado.

Se hicieron pruebas preliminares con papel, *primer* y tinta. Se realizaron mediciones con diferentes parámetros de medición del espectrofotómetro en el sustrato con *primer* y sin *primer*. Después de algunas pruebas, se encontró que el parámetro representativo para medir la diferencia entre el sustrato con y sin *primer*, es la luminancia de la reflexión difusa de la luz.

Se diseñaron experimentos analizando las variables de entrada, los factores influyentes y las variables de salida, estableciendo sus niveles y rangos. Estos experimentos se fueron realizando de manera iterativa, cambiando algunos factores controlables para mejorar el proceso de medición de la reflexión de la luz. Al final, se llega a una metodología experimental que cumple con los objetivos de la tesis, que analiza los resultados usando inferencia estadística y calculando la probabilidad de sus intervalos de confianza.

## 1. Introducción

El *primer* es un recubrimiento líquido previo a la impresión usado en las artes gráficas, sobre todo en el mundo del *offset* digital, para lograr la adhesión de las tintas en el sustrato. En esta tesis, se analizan los resultados del proceso de aplicación del *primer* en el sustrato.

La problemática que se pretende resolver es simple: el proceso de aplicación del *primer* al sustrato falla constantemente. Se desperdician horas máquinas, esfuerzo humano y material en repetir el proceso de aplicación del *primer*. Todo esto disminuye las ganancias de las empresas.

¿Dónde está la oportunidad?

En México todavía no existe una solución que se acomode a las necesidades del mercado. Existen máquinas especializadas en la aplicación de *primer* en Europa y Estados Unidos que no se distribuyen en México.

Las máquinas que se distribuyen en el país pueden ser caras, ineficientes o en el peor de los casos, ambas. En México, se acostumbra aplicar el *primer* al sustrato con una estación de flexografía, tomando la sugerencia de los fabricantes del *primer*.

Dos ejemplos de los métodos existentes para verificar la aplicación de *primer* en el sustrato son invasivos y fuera de línea. Éstos son:

- Verificar la impresión pegando y despegando una cinta adhesiva. Si la tinta se despega junto con la cinta, el *primer* está mal aplicado.
- Aplicar un líquido indicador al sustrato tratado y esperar 30 segundos para notar un cambio en la coloración y verificar el *primer* en el sustrato

El proyecto expuesto en esta tesis propone una innovación tecnológica. Un sistema no invasivo con el sustrato, que trabaje a todo momento y alerte al operador de una aplicación incorrecta del *primer* para que pueda hacer ajustes pertinentes antes de desperdiciar horas máquina, esfuerzo humano y material.

Aunque el *primer* es un líquido transparente, cuando se aplica al sustrato se nota un cambio en la reflexión de la luz (con ojo humano) cuando se compara con el mismo sustrato sin *primer*. Para medir los cambios de la luminancia en el sustrato con y sin *primer* se utiliza un espectrofotómetro.

Los experimentos realizados con el *primer*, las tintas y el espectrofotómetro sentaron las bases del principio de operación de lo que pretende ser un equipo accesorio que se instale en máquinas relacionadas con la industria del papel y las imprentas.

Se probaron algunos sensores industriales gracias a la colaboración de una empresa distribuidora de sensores de reflexión difusa, en un banco de pruebas construido para poder ajustar la posición del sensor con respecto al sustrato.

Con la ayuda de las oficinas en México de la empresa Avery Dennison S.A. de C.V., que facilitó muestras de tres sustratos diferentes, cada sustrato con y sin *primer*, se diseñaron tres experimentos y se llegó a datos alentadores sobre la manera en que el *primer* modifica la reflexión de la luz cuando está aplicado en el sustrato.

## 1.1 Estructura de la tesis

A continuación se presenta una breve descripción de la estructura de la tesis por capítulos y los temas que abordan.

- En el capítulo 1 de esta tesis se expone una introducción de la problemática y los pasos que se siguieron para cumplir el objetivo de la tesis.
- En los capítulos 2 “Definición del problema” y 3 “Objetivo de la tesis” se presentan la problemática de la aplicación del *primer* al sustrato, y los objetivos de la tesis y su alcance, el desarrollo del producto para uso industrial, el “*sistema de calidad de aplicación de primer usando reflexión de luz difusa*”
- En el capítulo 4 “Antecedentes” se muestran los conceptos básicos de luz, color, inferencia estadística y términos industriales de las imprentas e industria del papel.
- En el capítulo 5 “Definición del producto” se muestran los pasos que se siguieron para llegar al concepto final del producto que se menciona en el capítulo 3 “Objetivos de la tesis”
- En el capítulo 6 “Pruebas preliminares” se exhiben los resultados de las pruebas que se hicieron con papel, *primer*, tinta y con el espectrofotómetro con el fin de adquirir experiencia de la influencia que tiene el *primer* en el sustrato.
- En los capítulos 7 “Diseño de experimentos” y 8 “Realización de experimentos” se hicieron pruebas diseñadas para comparar la reflexión difusa de la luz del sustrato

con y sin *primer* y tener conclusiones basadas en la inferencia estadística del resultado de las muestras.

- En el capítulo 9 “Conclusiones” se muestran las conclusiones que responden a los objetivos generales y particulares de esta tesis.

## 2. Definición del problema

El proceso de aplicación del *primer* al sustrato falla constantemente. El *primer* es un líquido transparente adhesivo que se aplica en el sustrato, previo a la impresión, para que la tinta se adhiera a él.

Durante el desarrollo de la tesis, no existió en el mercado algún método no invasivo y en línea para la verificación de la aplicación del *primer* en el sustrato. Esto genera que la aplicación del *primer* se verifique deteniendo la línea de tratamiento o impresión del sustrato, usando algún líquido indicador, o haciendo una prueba de adhesión de la tinta al sustrato, posterior a la impresión, al pegar y despegar encima de la tinta una cinta adhesiva.

Si la aplicación del *primer* es incorrecta, obliga a las empresas a volver a comenzar el proceso de tratamiento de *primer* en el sustrato o recurrir a la compra de papel pre tratado, el cual a su vez podría sufrir de una aplicación de *primer* errónea.

Para las imprentas, industria del papel y empresas relacionadas con las artes gráficas esto implica que:

- Se pierden horas máquina y humanas en repetir el proceso de aplicación de *primer* al sustrato.
- Las ganancias que se tienen del material, bajan.
- Se atrasa la producción y se generan *cuernos de botella*.
- Ante la necesidad de imprimir, se tiene que comprar sustrato previamente tratado de emergencia.
  - Incluso el tratamiento del sustrato pretratado con *primer* puede presentarse defectuoso. Esto afecta, tanto a las imprentas, como a la industria del papel y distribuidores de sustrato.

### 3. Objetivo de la tesis

El objetivo de esta tesis es, mediante el diseño y análisis de experimentos, plantear una metodología experimental que sirva para encontrar un parámetro de medición, que logre diferenciar el estado del sustrato, cuando se encuentre sin *primer* o cuando se encuentre aplicado con *primer*.

Los objetivos particulares son:

- En el diseño y realización de experimentos se deben encontrar y ajustar los factores que más influyan en el proceso de sensado del sustrato.
- Encontrar una probabilidad de confianza de que una medición dada pertenezca al sustrato aplicado con *primer* o al sustrato sin *primer*

Esta tesis forma parte de un proyecto mayor, el alcance de este proyecto es el desarrollo de un producto, un *sistema de calidad de aplicación de primer usando reflexión de luz difusa* que ayude a maximizar la eficiencia del proceso ahorrándole a las empresas tiempo, horas máquina, esfuerzo humano y merma de material derivadas de la problemática de la aplicación de *primer* al sustrato. El sistema deberá estar montado en línea en máquinas de impresión o de tratado de sustrato.

Las investigaciones y resultados obtenidos en esta tesis conforman la base para continuar con el desarrollo del sistema de calidad.

#### 3.1 Metodología

En el capítulo 5 “Desarrollo del concepto del producto” se delimitan los objetivos de esta tesis y se analizan algunos factores del desarrollo del producto, como alcance final del proyecto.

El alcance del proyecto empezó como una máquina automática de tratamiento integral de *primer* al sustrato. Con los resultados de investigación de tecnologías existentes, un estudio de mercado con varias imprentas y finalmente con un estudio a fondo del proceso de aplicación del primer con sólo una de estas empresas, el alcance del proyecto se delimitó en el desarrollo del *sistema de calidad de aplicación de primer usando reflexión de luz difusa* como producto, y el objetivo de la tesis se delimitó a encontrar un parámetro de medición para diferenciar al sustrato cuando se encuentra o no aplicado con *primer*.

Los capítulos 6, 7 y 8 se enfocan en la resolución de los objetivos generales y particulares de esta tesis.

## 4. Antecedentes

En este capítulo se exponen los antecedentes de la luz, color, interferencia estadística y los conceptos básicos usados en la industria de las imprentas, sus industrias conexas y la industria del papel. En el apartado 4.5 se encuentra un glosario de conceptos para las secciones 4.1 Luz y 4.2 Color. Estos conceptos aparecen resaltados en el texto.

### 4.1 Luz [1]

La primera teoría acerca del origen de la luz fue hecha por Isaac Newton en 1704 en su libro *Optics*. Esta teoría propuso que la luz está compuesta por pequeñas partículas o corpúsculos.

Christiaan Huygens, contemporáneo de Newton, propuso que la luz se comportaba como una onda, enfoque apoyado también por Robert Hooke. En 1803, Thomas Young también contribuyó a la teoría de que la luz era una onda demostrando que existe **interferencia** entre diferentes haces de luz cuando ocupan el mismo espacio. Después, apoyando esta teoría, Augustin-Jean Fresnel y François Arago explicaron la **polarización** de la luz en términos de ondas de luz transversales.

En 1850, con los experimentos de Léon Foucault y con la confirmación de resultados de Hippolyte Fizeau de que la luz se mueve más lento dentro del agua en comparación con el aire, la teoría corpuscular de Newton parecía desacreditada.

Pasaron los años y la teoría de que la luz es una onda se fortaleció con el trabajo teórico de los físicos como Fresnel, quien también explicó la **interferencia** y **difracción** usando la teoría de ondas.

La teoría de que la luz es una onda tuvo su apogeo con James Clerk Maxwell, quien desarrolló la teoría de la radiación electromagnética y descubrió que la luz forma sólo una pequeña parte del **espectro** electromagnético, como se muestra en la figura 4.1.

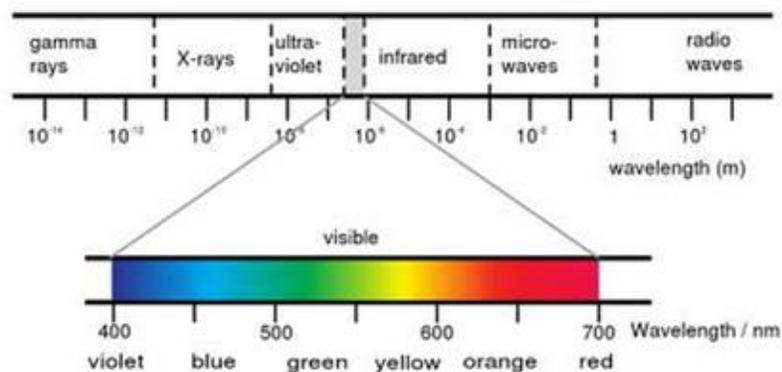


Figura 4.1 [1]. El espectro electromagnético. Se muestran las longitudes de onda del espectro visible. Entre los 400 nm (violeta) y 700 nm (rojo).

La teoría de Maxwell fue confirmada experimentalmente por Heinrich Hertz, cuyos experimentos con las ondas electromagnéticas dieron pie a la invención del radio.

Sin embargo, ninguno de estos descubrimientos pudo refutar por completo la teoría de que la luz se encuentra formada por partículas.

A principios del siglo XX la teoría de que la luz está compuesta por partículas se retomó principalmente gracias a Albert Einstein. En 1895 se observó que iluminando con una luz ultravioleta una superficie de metal, esta superficie emitía partículas negativas, identificadas posteriormente como electrones y fueron llamados fotoelectrones. Estos fotoelectrones se observaron cuando la frecuencia de **radiación** excedía un cierto valor, que varía de material a material. La cantidad de fotoelectrones aumentaba de manera proporcional a la intensidad de la luz, pero su energía se mantenía constante para cualquier fuente de luz.

La explicación a este efecto fotoeléctrico propuesto por Einstein en 1905 se basó en la idea de que la luz se comportaba como pequeñas partículas, llamadas actualmente fotones. Cada fotón entrega la misma cantidad de energía y es proporcional a la frecuencia de la iluminación.

Es decir, la intensidad de la luz indica el número de fotones que llegan a la superficie. Así, el número de fotoelectrones emitidos por la superficie del material está en función de la **irradiancia**. Estas conclusiones apoyan la teoría de que la luz está constituida por partículas, pero la energía de estos electrones está en función de su frecuencia de onda, apoyando la teoría de que la luz es una onda.

Como conclusión, para fenómenos en una escala mayor, cuando los objetos son, por lo menos, de algunos cientos de nanómetros, es necesario pensar que la luz se comporta como una onda electromagnética. Para procesos atómicos se toma la luz como una interacción de fotones.

#### **4.1.1 Interacción de la luz con los materiales**

La interacción de luz con los materiales se puede dividir en dispersión y absorción: cuando se habla de dispersión, se toma la luz como onda electromagnética y cuando se habla de absorción, se toma la luz en término de fotones.

Cuando la energía que se dispersa es igual a la energía de la luz incidente, se llama dispersión elástica. Cuando no es así, se llama dispersión plástica.

La dispersión elástica sobre una superficie se llama reflexión. La dispersión elástica a través de un sólido transparente se llama refracción. La dispersión debido a pequeñas partículas o detalles minúsculos en objetos más grandes, se llama difracción. Para fines prácticos se toman todos estos factores como parte de un sólo concepto: dispersión.

Un ejemplo donde la luz se pierde a través de la absorción, es la fluorescencia; sin embargo, ese tema no es de competencia en esta tesis.

### 4.1.2 Reflexión

La reflexión de la luz en un objeto depende de varios factores. Uno de los más importantes es la rugosidad de la superficie.

Si la superficie es lisa, la reflexión es especular; si la superficie es rugosa, la reflexión es difusa. La reflexión difusa aumenta a expensas de la reflexión especular y viceversa.

Ambos tipos de reflexión se pueden encontrar al mismo tiempo, cuando se refleja un haz de luz sobre alguna superficie. Por ejemplo, si se quiere reflejar luz de un material compuesto de granos finos, su reflexión será únicamente difusa, como se muestra en la figura 4.2.

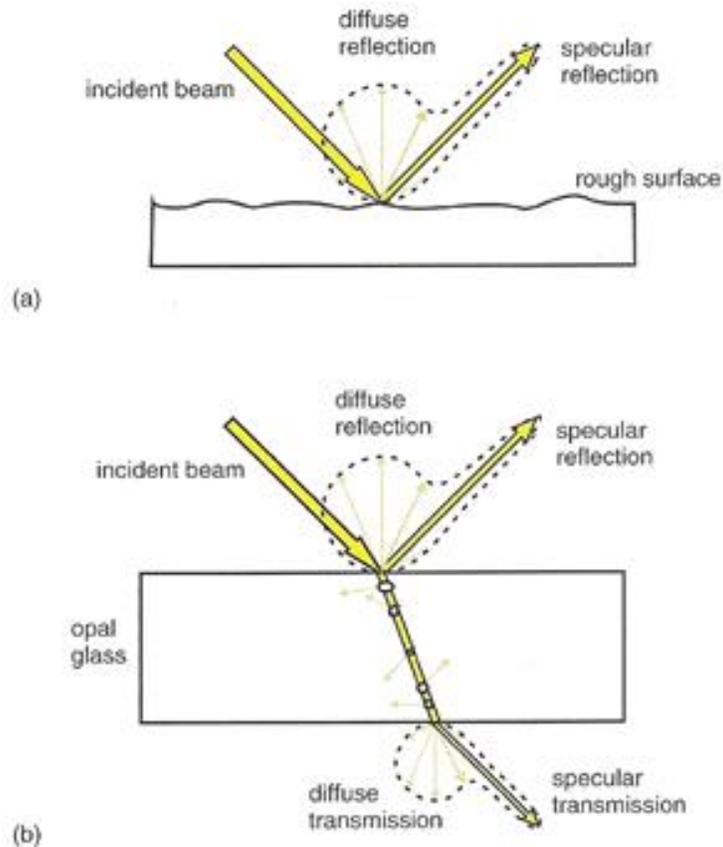


Figura 4.2 [1]. (a) Reflexión de un haz de luz sobre una superficie rugosa. Esta reflexión tiene dos componentes: reflexión difusa y reflexión especular. (b) La luz que pasa a través de un material translúcido también tiene componentes especulares y difusas de luz transmitida.

## 4.2 Color

La luz no tiene color. Esta es generada por una fuente, después interactúa con algún material y al final es captada por el ojo. El color, o la percepción del color, es el resultado de un proceso entre el ojo y el cerebro que sirve para discriminar luces por su diferente longitud de onda y energía.

Los colores se representan comúnmente como puntos en sistemas coordenados tridimensionales. Existen diferentes maneras esquemáticas para encontrar los 3 parámetros con los que se pueden identificar los colores. A estos esquemas se les llama *espacios de color*. Se le llama *modelo de color* al modelo matemático que permite representar los colores en forma numérica. Un modelo usado comúnmente es el HSB (*hue, saturation, brightness*). Otras maneras de llamar a este modelo son: HVC (*hue, chroma, value*), HSL (*hue, saturation, luminance*), HCL (*hue, chroma, luminance*). En la figura 4.3 se muestran representaciones del espacio de color HSB

Los parámetros de este modelo son:

- Matiz (*Hue*): Se asocia a la longitud de onda o frecuencia de la radiación. Es la propiedad que le da su nombre a los colores. También se le llama tono o tinte.
- Saturación (*Chroma*): Corresponde a la cantidad de luz blanca mezclada con el matiz que origina colores pálidos o deslavados.
- Luminancia (comúnmente llamado brillo): Describe la intensidad del color. Está relacionada con la cantidad de fotones que llegan al ojo.

Con respecto a la reflexión de luz, la luminancia es la intensidad de luz de una superficie por unidad de área. Sus unidades son  $cd\ m^{-2}$ . La unidad  $cd$  se refiere a las candelas. La candela es la luz emitida  $lm\ sr^{-1}$  (lumen por **ángulo sólido**). El lumen es la unidad de la energía luminosa emitida.

Las unidades mencionadas son usadas en la fotometría, que estudia el espectro visible de ondas electromagnéticas. Por otro lado se encuentra la radiometría que estudia todas las ondas electromagnéticas. En la tabla del Anexo 1.1 se tienen unidades equivalentes de radiometría y fotometría.

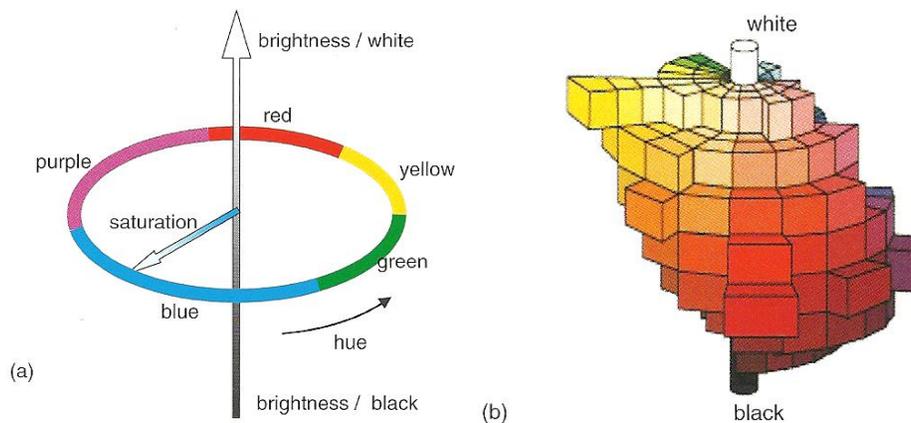


Figura 4.3 [1]. Representaciones de espacios de color del modelo HSB. (a) El matiz está dado por un punto en la circunferencia del disco plano, la saturación es la distancia del centro al aro sobre el radio del disco y la luminancia está dada sobre el eje vertical del esquema. (b) La representación del sólido de los colores forma un cilindro de colores, mejor conocido como el *cilindro de colores Munsell*.

### 4.2.1 Coloración aditiva

La coloración aditiva ocurre cuando dos haces diferentes de luz se combinan. Por ejemplo, las televisiones usan pequeños píxeles de diferentes colores que llegan al ojo al mismo tiempo, o la técnica de pintura del puntillismo, donde los puntos dibujados de cada color no se enciman entre sí en el lienzo.

El rango de colores que se pueden producir partiendo de algunos pigmentos básicos es sobresaliente. Se encontró que la mayoría de los posibles colores aditivos se pueden generar mezclando 3 colores primarios aditivos: rojo, verde y azul. La generación de colores usando estos 3 colores primarios aditivos nombra al modelo de color *RGB*.

El estudio de la mezcla de la luz ha sido cuantificado por la *Comission Internationale de l'Eclairage (CIE)*, que ha trabajado en el concepto del *triángulo de color* a través de los años con la intención de que la caracterización de las percepciones de color sea más exacta.

El primer diagrama de cromaticidad se propuso en 1931, se muestra en la figura 4.4.

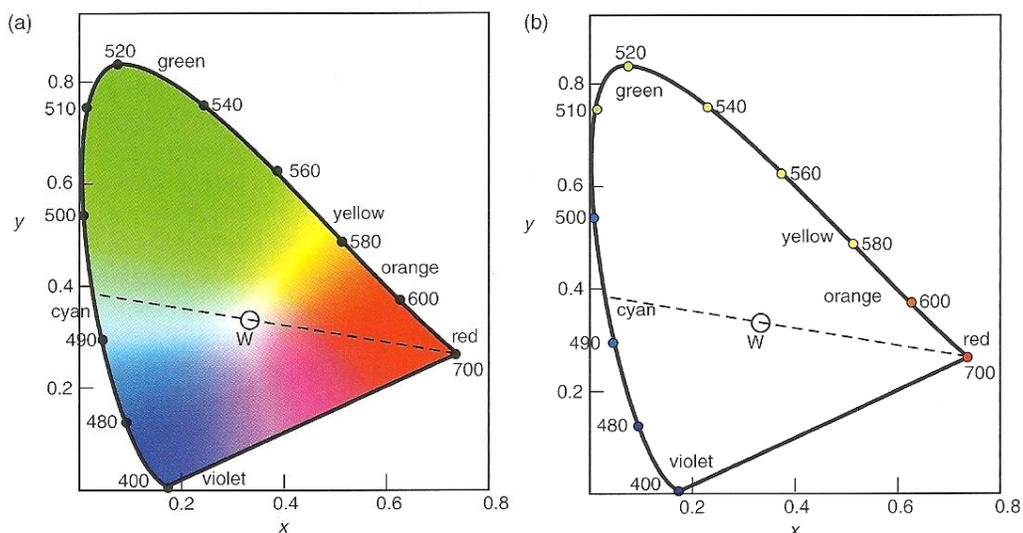


Figura 4.4 [1]. El diagrama de cromaticidad de la CIE de 1931. (a) Los colores del espectro están acomodados alrededor de una línea curva y los colores que no son del espectro caen en la línea que une al violeta (400nm) y al rojo (700nm). En el perímetro de la curva están marcadas las longitudes de onda de los colores. Los puntos dentro del área del esquema representan colores formados con coloración aditiva agregándoles luz blanca. El punto W indica la luz blanca. (b) Una línea recta que pasa por W une dos colores complementarios en la periferia del diagrama, en este ejemplo rojo y cian.

### 4.2.2 Coloración substractiva

Al igual que con la coloración aditiva, se pueden crear casi todos los colores usando la coloración substractiva. Para esto, se tienen 3 colores primarios substractores: cian, que absorbe el rojo y transmite azul y verde; magenta, que absorbe el verde y transmite rojo y azul; amarillo, que absorbe el azul y transmite verde y rojo.

Las impresoras a color usan tintes cian, amarillo y magenta para generar imágenes a color. Estos tintes se depositan encima de papel blanco y absorben su color primario apropiado. La luz blanca reflejada se merma por estos colores y muestra el tono correcto de la imagen por substracción de color.

En las imprentas e industrias del papel se usa el modelo *CMYK* (*cyan, magenta, yellow, key*) que es una versión moderna y más precisa del modelo *RGB*. Aunque la combinación del cian, magenta y amarillo produce un color negro, se incluye un tinte negro en este modelo (*key*). Esto ayuda a economizar la cantidad de tinta usada de los 3 colores primarios substractores y para lograr tonos más negros.

### 4.2.3 CIELAB [2]

El modelo de color  $L^*a^*b^*$  (CIELAB) se deriva del modelo maestro de la CIE de 1931. El CIELAB fue creado en 1976. Uno de sus atributos más importantes es que los colores están definidos de manera independiente según su origen o visualización.

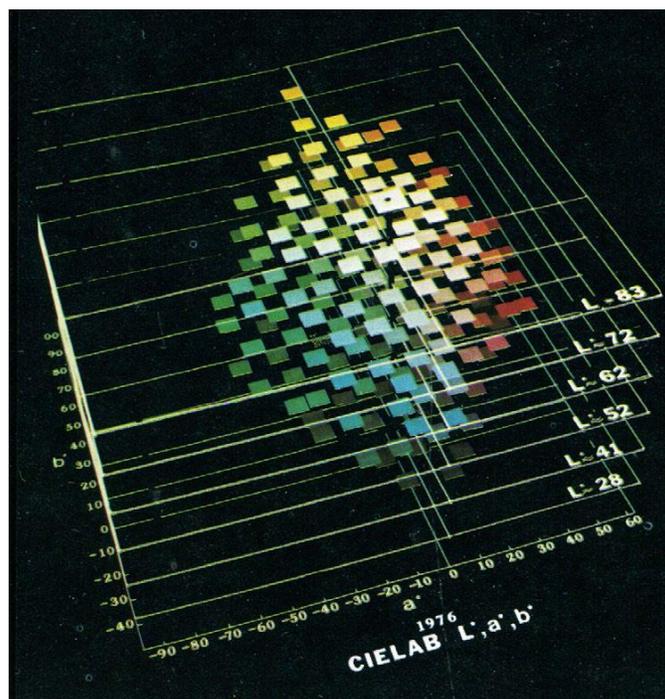


Figura 4.5 [2]. Diagrama del CIELAB representado en 3 dimensiones donde se tiene un plano con coordenadas de  $-a^*$  (verde) a  $+a^*$  (rojo) en el eje x, y de  $-b^*$  (azul) a  $+b^*$  (amarillo) en el eje y. En el eje vertical se tiene el mismo plano con diferente luminancia  $L^*$ .

El modelo de color  $L^*a^*b^*$  y el HCL son usados actualmente en las imprentas e industrias del papel. En la figura 4.5 se muestra una representación del modelo de color.

El parámetro usado, analizado y comparado para esta tesis fue la luminancia en el modelo de color  $L^*a^*b^*$ .

### 4.3 Conceptos básicos de imprentas e industria del papel

- *Offset* tradicional: En el método de impresión *offset*, la transferencia de la tinta al sustrato es indirecta, de ahí obtiene su nombre.

Para empezar, se transfiere la tinta de un rodillo de goma a un rodillo cubierto de una placa de aluminio que contiene grabado un patrón de impresión. Después, la tinta en el patrón de impresión, se transfiere a un rodillo con una cubierta de goma, llamada mantilla, y de ahí, por presión, se transfiere al sustrato.

Cada color tiene su propia estación, su propia placa de aluminio, su propio patrón, etc. El sustrato pasa de estación a estación hasta que se depositan todos los colores en él.

Este método de impresión es común en tirajes de impresión grandes, en parte, por el tiempo tan grande que se toma en preparar cada una de las estaciones de color.

En el *offset* y en el *offset* digital se utiliza el modelo de color *CMYK*.

- *Offset* digital: El método de impresión de *offset* digital se basa en el concepto de la transferencia indirecta de la tinta del *offset* tradicional, pero tiene otra tecnología.

Se dibuja con un láser el patrón de impresión sobre un rodillo cubierto de una superficie compuesta de un polímero con aluminio de base. En cada pixel del patrón por donde pasa el láser, ocurre una reacción fotosensible en el polímero y a través de la capa aluminio, conectada a tierra, se descarga, llevando la diferencia de potencial de cada pixel cerca de cero.

La tinta se transfiere al patrón dibujado desde un rodillo de goma por diferencia de potencial, no por presión. El patrón con tinta se transfiere a una mantilla y de la mantilla, por presión, pasa al sustrato. Al final, el patrón de ese color se borra, para dibujar el siguiente patrón de color y repetir el ciclo tantas veces como colores existan en esa impresión en particular.

Este tipo de impresión se usa en tirajes medianos y cortos. El tiempo de preparación de la maquina consta de algunos minutos en comparación con las horas de preparación de las máquinas de *offset* tradicional.

- *Primer*: El *primer* es un líquido transparente necesario para que las tintas de las máquinas de impresión digital se adhieran al sustrato. Su aplicación es previa a la impresión. El uso de *primer* es particular del *offset* digital.



Figura 4.6. *Primer*

- *Sustrato*: Se llama sustrato al material donde se imprime. El más común es papel, pero también se puede imprimir en plásticos y materiales metálicos.

El sustrato tiene 2 presentaciones: hoja y bobina.

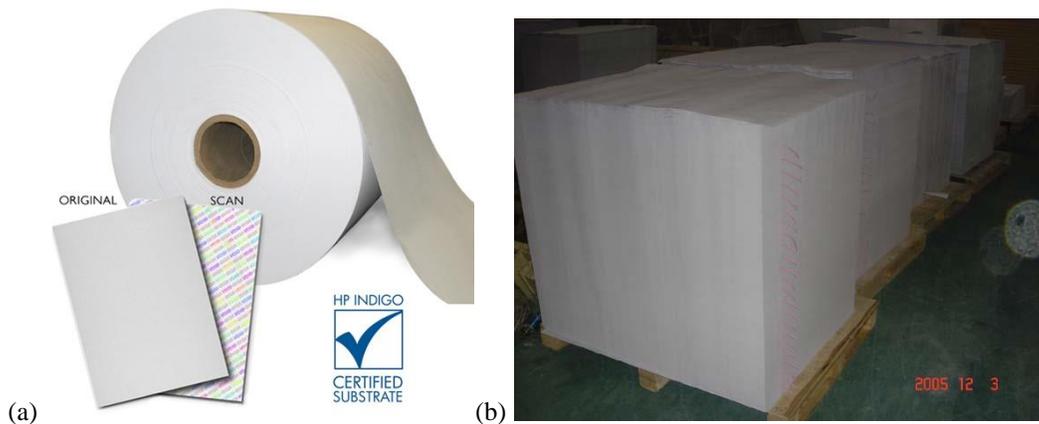


Figura 4.7. (a) Sustrato en bobina. (b) Sustrato cortado en hojas.

- *Tratamiento corona*: El *tratamiento corona* se aplica en una estación de alto voltaje la cual aumenta la energía de la superficie del sustrato a fin de incrementar la permeabilidad de los mismos para favorecer a la adhesión de las tintas, cubiertas y adhesivos.

## 4.4 Inferencia estadística [3]

El objetivo de la estadística inferencial es sacar conclusiones o hacer predicciones acerca de las características de una población a partir de la información contenida en una muestra.

Cuando la población es desconocida y sólo se dispone de una muestra de esa población, la probabilidad se usa para hacer enunciados acerca de la composición de la población, es decir, hacer inferencia estadística.

### 4.4.1 Distribución normal

Las distribuciones de probabilidad pueden tomar varias formas, pero un gran número de variables aleatorias observadas en la naturaleza, poseen una distribución de frecuencia que tiene más o menos la forma de un montículo, o bien, es aproximadamente una distribución normal de probabilidad.

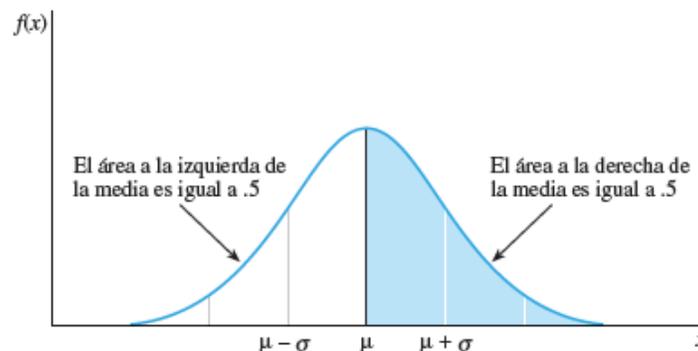


Figura 4.8 [3]. Distribución normal de probabilidad. En el eje de las ordenadas se encuentra la frecuencia relativa  $f(x)$  y en el eje de las abscisas se encuentran los valores de la variable observada.

### 4.4.2 Estimación de muestras grandes

- Teorema del límite central

Si se seleccionan al azar muestras de  $n$  observaciones de una población con una media finita  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$ , entonces, cuando  $n$  es grande, la media muestral  $\bar{y}$  tiene una distribución aproximadamente normal, con media igual a  $\mu$  y desviación estándar igual a  $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ . La aproximación se vuelve más precisa a medida que  $n$  aumenta.

Se tiene:

$$\bar{y} \approx \mu$$

$$\sigma_{\bar{y}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

- Media muestral

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

- Desviación estándar muestral

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}}$$

- Variable aleatoria normal estándar

Una variable aleatoria normal está estandarizada al expresar su valor como el número de desviaciones estándar que se encuentran a la izquierda o derecha de la media.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

- Intervalos de confianza

$$\bar{y} \pm z_{\alpha/2} s_{\bar{y}}$$

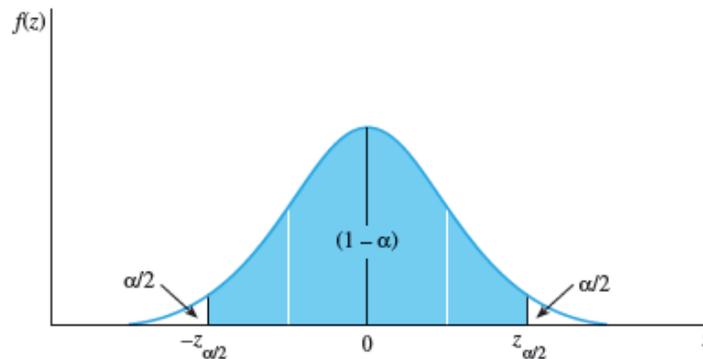


Figura 4.9. Intervalo de confianza de  $(1 - \alpha) \times 100\%$ .

En la figura 4.9 se muestra un intervalo de confianza de  $(1 - \alpha) \times 100\%$ . Esto quiere decir que el  $(1 - \alpha) \times 100\%$  de los valores se encuentra bajo el área azul. Es decir, existe una probabilidad de  $(1 - \alpha) \times 100\%$  que el valor de la variable se encuentre en esa área azul.

## 4.5 Glosario de conceptos de luz y color

- Ángulo de incidencia: Es el ángulo que se forma entre la normal de la superficie y el haz de luz. Es el ángulo  $\theta_1$  de la figura 4.10.

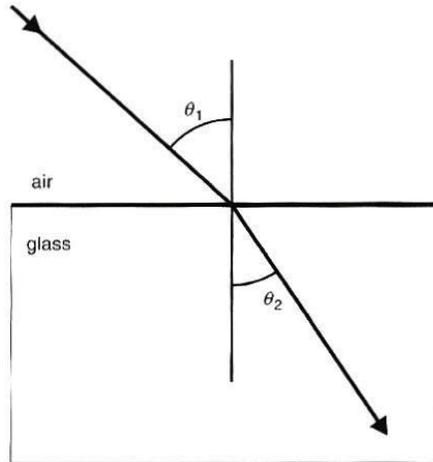


Figura 4.10 [1]. Refracción de un haz de luz conforme entra de un medio de refracción bajo como el aire a un medio de refracción medio como el vidrio.

- Ángulo sólido [4]: El ángulo sólido es un ángulo bidimensional para los espacios tridimensionales que es subtendido por una superficie en un punto. Es una medida para indicar qué tan grande se ve un objeto desde un punto dado.

La unidad del ángulo sólido es el esterradian. La medida del ángulo sólido de un cuerpo se relaciona con el área de una esfera unitaria de manera similar que los radianes se relacionan con la cuerda de una circunferencia.

Esta área se forma proyectando la superficie del objeto a observar en una esfera unitaria, hacia un punto P que es el vértice del cono que se forma entre el punto y la proyección. Este punto coincide con el centro de la esfera.

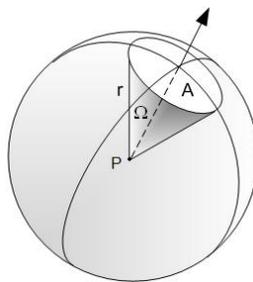


Figura 4.11. Ángulo sólido  $\Omega$ , área A y radio de la esfera  $r$ .

- Coherencia: Se dice que hay coherencia cuando todas las ondas de los haces de luz están sincronizados en fase.
- Cuerpo negro: Es un objeto idealizado que absorbe y emite todas las longitudes de onda a la perfección.

El comportamiento de la radiación de un cuerpo negro fue descrito exitosamente por Max Planck en 1901.

El color de un objeto incandescente se describe por su *temperatura de color* si su espectro se asemeja a la de un cuerpo negro. La mayoría de los sólidos se comporta como *cuerpo negro* en algún punto de temperatura y longitud de onda emitida.

Un cuerpo negro se compara comúnmente con la luz de las estrellas, en las cuales se encuentra la mayor parte de longitudes de onda visibles y se llega a una tabla de *temperatura de color* correlacionado:

**Table 1.2** *Colour temperature of incandescent sources*

Light source	Correlated colour temperature/K
Mean noon sunlight	5 400
Electronic flash	~7 000
Blue flash bulb	~6 000
Tungsten-filament photographic lamps	~3 400
Tubular triphosphor fluorescent lamp, 36 W	3 000
Household tungsten-filament light bulb, 100W	2 850
Standard candle	1 930

**Table 1.3** *Effective star temperatures*

Star colour and example	Effective temperature/K
Blue–white, Bellatrix	25 000
White, Sirius	11 000
Yellow–white, Sirius–Solar	7 500
Solar, the Sun	6 000
Orange–yellow, Arcturus	4 200
Orange, Antares	3 000
Deep orange–red, $\mu$ -Cephei	2 600

Figura 4.12 [1]. Las tablas de correlación de *temperatura de color*.

- Espectro: Distribución de la intensidad de una radiación en función de una magnitud característica, como la longitud de onda, la energía, la frecuencia o la masa.

- Incandescencia: Es la emisión de luz que puede ser generada por un cuerpo caliente. Este fenómeno ocurre a nivel atómico tomando la luz como conjunto de fotones, no como onda.

A temperaturas altas las longitudes de onda resultantes de la **radiación** llegan a la región visible del espectro de ondas y se observan cambios en su color.

- Interferencia: Si dos ondas de luz ocupan la misma región en el espacio al mismo tiempo, se suman o interfieren. Esta idea se llama *principio de superposición*, creada por Young en 1802.
- Irradiancia: La cantidad de luz que el ojo capta, que se podría llamar brillo o intensidad de la luz, no es la amplitud de la onda de luz, es la irradiancia  $I$ , la cual es proporcional al cuadrado de la amplitud.

$$I = K(\varepsilon_0)^2$$

Siendo  $\varepsilon_0$  la amplitud de onda y la constante de proporcionalidad  $K$  depende del medio que contiene la onda.

- Monocromatismo: Se dice que un haz de luz es monocromático cuando está comprendida en un rango muy pequeño de longitudes de onda.
- Polarización: La manera en que el vector de campo eléctrico está delimitado describe la polarización de la onda.
- Radiación: Energía ondulatoria o partículas materiales que se propagan a través del espacio.

## 5. Desarrollo del concepto del producto

En el capítulo 5 de esta tesis se analiza el impacto económico que el alcance del proyecto, el *sistema de calidad de la aplicación de primer* podría tener en el mercado. Se genera un concepto de producto, se estudian los segmentos de clientes y se hace una investigación de información acerca del mercado de la industria de las artes gráficas desde 1999. Este desarrollo está basado en el libro *Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers* [5].

El segmento de clientes definido para esta tesis, es el nicho de las imprentas e industrias conexas, y la industria del papel, como son llamados por INEGI. Se hizo una investigación del número de “Unidades económicas”, figura 5.1, y del “Total de compras de maquinaria y equipo de producción”, figura 5.4, para tener una idea del tamaño del mercado y de las posibles ganancias del producto.

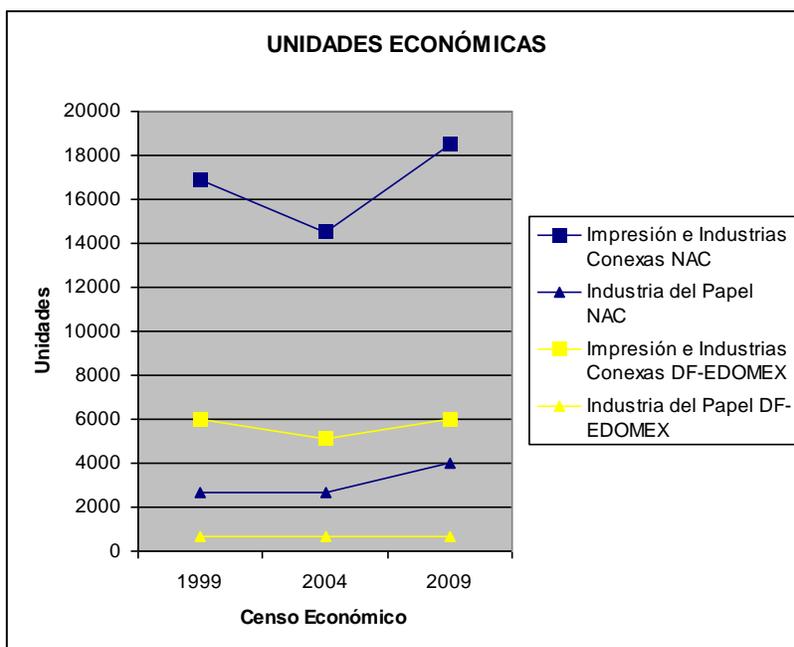


Figura 5.1 [6]: Unidades económicas según los censos económicos del INEGI de 1999, 2004 y 2009

Las series azules de la figura 5.1 indican los posibles clientes que son todas las empresas de México de papel e imprentas con su industria conexas, mientras que las series amarillas muestran las mismas empresas que se encuentran solamente en el Distrito Federal y el Estado de México.

El segmento de clientes inicial para la distribución del producto es la zona del Distrito Federal y Estado de México. En total se tienen 6,638 empresas como mercado inicial, estas empresas son:

- 5,977 unidades económicas de imprentas
- 661 unidades económicas de la industria del papel.

## 5.1 Investigación de mercado

Como se ve en la figura 5.2, en el año 2010 el porcentaje de impresión digital en el mundo fue del 20%. Se proyecta que para el año 2020 subirá hasta el 40%. La proyección de servicios relacionados con la industria de las artes gráficas también aumenta, del 25% al 30% aproximadamente.

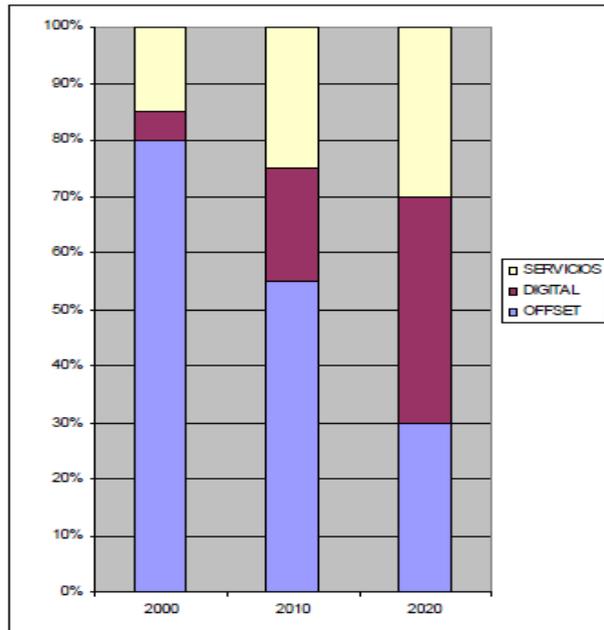


Figura 5.2 [7]: Proyecciones de impresión para el año 2020.

En México, durante el año 2008 [7], el porcentaje de empresas que imprimieron con tecnología digital fue del 15%, como se ve en la figura 5.3.

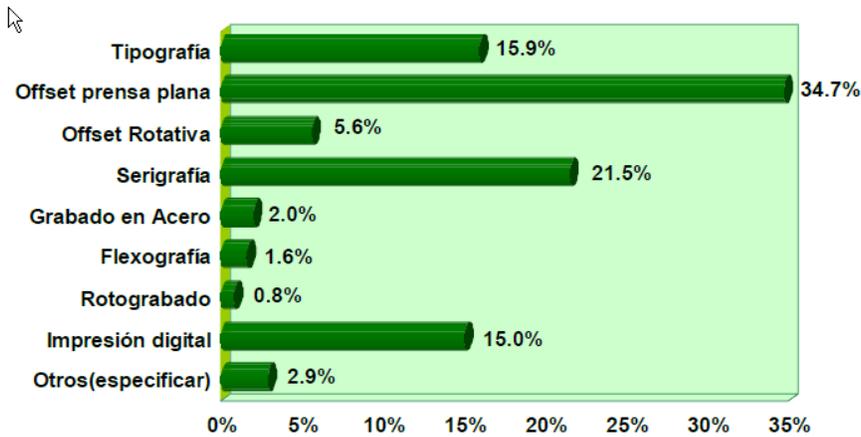


Figura 5.3 [7]: Porcentajes de impresión en México 2008.

La cantidad de dinero gastado en compra de maquinaria para las imprentas y sus industrias conexas, durante el año 2008 [6] en el D.F. y el Estado de México fue \$626, 791, 000. Al mismo tiempo, la cantidad de dinero de la industria del papel gastada en compra de maquinaria fue \$737, 481,000.

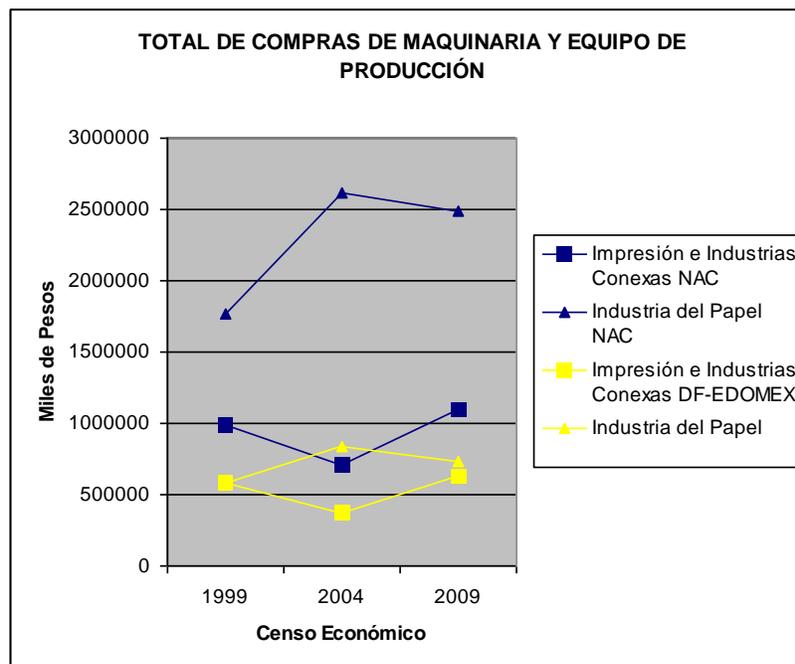


Figura 5.4 [6]. Total de compras de maquinaria y equipo de producción

De la cámara nacional de las artes gráficas (CANAGRAF), en el 2008, el 15% de las imprentas imprime usando tecnología digital. Para dimensionar de manera preliminar el

tamaño del mercado, se toma un porcentaje pesimista del 10% de imprentas que usan tecnología digital (multiplicando de 0.1 en la ecuación 5.1.).

Si se supone que un tercio (multiplicando de 0.333 en la ecuación 5.1) de la cantidad de dinero se destina al tratado de papel, se tiene la siguiente operación:

$$(626,791,000 + 737,481,000) * 0.1 * 0.333 = \$ 45,430,257$$

Ecuación. 5.1. Cálculo del tamaño del mercado

Para el segmento de cliente se tiene un mercado de aproximadamente 45 millones de pesos al año en la compra de maquinaria y equipos de producción.

Si se toma el número de clientes posibles definidos (6,638), y se toma de él un 10% pesimista, el número resultante de empresas está alrededor de 650.

Del primer estudio de mercado, expuesto en la sección 5.2.1 y en el anexo 3, se obtiene una estimación de precio de venta de \$300,000 para una máquina integral de aplicación de *primer* al sustrato. Tomando ese precio como base, se hacen las siguientes suposiciones para calcular una ganancia:

- Precio de venta = \$50,000
- Costo de producción = \$25,000 Estimado
- Margen de ganancia del 50%, es decir \$25,000.
- Ganancia = 650 x 25,000 = \$ 16,250,000

En términos generales, las ganancias del sistema de calidad de aplicación de *primer* al sustrato podrían ser de \$ 16, 250,000.

## 5.2 Primera recopilación de información

La primera idea para solucionar el problema de la aplicación de *primer* al sustrato fue construir una máquina completa automatizada, desde el alimentador automático, la aplicación del *primer*, traslado y manipulación del sustrato (el sustrato en hoja es más difícil de manejar que el sustrato en bobina), sensado de la calidad de la aplicación del *primer* y la salida (rebobinado para las bobinas o un *stacker* para las hojas) del sustrato.

Antes de realizar el primer estudio de mercado con algunas imprentas acerca de los problemas que se tienen con el sustrato en los procesos previos y posteriores a la impresión,

se realizó un estudio y un análisis funcional [8] de los alimentadores automáticos de sustrato en hoja que se puede consultar en el anexo 2.

### 5.2.1 Primer estudio de mercado

Se le aplicó el cuestionario del primer estudio de mercado, anexo 3, a 8 diferentes empresas del negocio de las artes gráficas. De estas 8 empresas:

- 7 empresas imprimen con tecnología digital
  - De esas 7, 6 imprimen con maquinaria de *offset* digital, producida por una empresa líder en el mercado.
- 1 empresa imprime únicamente con *offset* tradicional.

Los resultados son:

- De las 7 empresas que trabajan con tecnología de *offset* digital, 6 de 7 reportaron problemas con la aplicación del *primer*, o sea el 85.74%
  - Las 6 empresas que reportaron problemas con la aplicación de *primer*, imprimen con maquinaria producida por la misma empresa, líder en el mercado.
- La empresa que imprime con máquinas de *offset* tradicional menciona problemas con otro tratamiento previo para el anclaje de tinta, el tratamiento corona. Es un tratamiento de alto voltaje al sustrato para modificar su energía superficial y mejorar la adhesión de la tinta al sustrato.

El sustrato para las maquinas digitales también puede requerir tratamiento corona pero el uso del *primer* es exclusivo del *offset* digital.

### 5.2.2 Tecnología existente

Ante los resultados de que todos los encuestados presentan problemas con el anclaje de las tintas en el sustrato, y especialmente con la aplicación del *primer*, se hizo un estudio de las tecnologías existentes para la aplicación de *primer* al sustrato.

De las empresas que asistieron a la *DRUPA* 2012 [9] (*DRUPA* es la exposición de equipos para imprentas más grande del mundo, llevado a cabo en Düsseldorf, Alemania) se encontraron dos equipos especializados para la aplicación de *primer*: Hunkeler Pc7 Module [10] y Epic Digital Coater [11].

Presuntamente, en México, ambas empresas distribuyen sus módulos aplicadores de *primer* a través de los canales de distribución de las imprentas, no con distribuidores propios.

De las empresas que asistieron a la Expográfica 2013 en Guadalajara [12], ninguna ofrecía un módulo especializado de aplicación de *primer*, ya que los fabricantes, frecuentemente recomiendan su uso con una estación de flexografía, por ejemplo el *primer* de Michelman, Sapphire para las HP Indigo [13].

### 5.3 Segunda recopilación de información

Al validar el problema de la aplicación del *primer* y la tendencia del mercado de dirigirse hacia la impresión digital, se elaboró un segundo cuestionario (anexo 4) para conocer con detalles la problemática que tienen las imprentas debido a la aplicación del *primer* al sustrato.

En este cuestionario se plantea por primera vez la innovación tecnológica que presentaría el proyecto de la máquina integral automatizada del proceso de aplicación de *primer*, el sentido del *primer* en el sustrato:

*“Este sistema tiene como entrada el papel tratado, un proceso de sentido no invasivo a todo lo ancho del papel, un indicador para el operador y como salida el mismo papel. El sistema no interfiere con el traslado del papel.”*

*El sistema está trabajando en todo momento y cuando sense alguna parte de sustrato sin *primer*, parará automáticamente el proceso o le mandará una alerta al operador para detener el proceso manual y tomar medidas.”* (Anexo 4).

Este cuestionario se le aplicó a una imprenta interesada en la resolución del problema de aplicación de *primer* al sustrato. El cuestionario fue realizado en persona, se grabó y se transcribió posteriormente.

El resumen de los resultados de la encuesta es:

Merma:

- De bobinas de 1500 metros de lineales, se pueden desperdiciar por culpa del proceso de aplicación de *primer*, 50 metros de sustrato. Se indicó un desperdicio menor al 10% del material total por bobina.

- El mayor problema es el desperdicio de horas máquina y el *cuello de botella* con la producción. Pueden llegar a tener 10 bobinas atrasadas, esperando impresión y no se puede imprimir por no tener material preparado.
- Debido a la necesidad de repetir el proceso de aplicación de *primer* en los materiales, la ganancia por bobina puede disminuir de 30% al 20-25%.

La velocidad de aplicación del *primer* depende del tipo de sustrato. En papel es más rápido que en las películas.

Papel pre tratado:

- El porcentaje de material usado es: 70% pre tratado y al 30% del material le aplican *primer* posteriormente en la imprenta. El porcentaje puede llegar a ser 50-50.
- La mitad del sustrato pre tratado que compran, lo regresan por estar mal aplicado. Se revisa con un plumón que tiene un líquido indicador especial para *primer*.
- En la producción, se dan cuenta que la aplicación del *primer* no es correcta hasta el momento de imprimir. Se realiza la prueba de adhesión con una cinta Scotch 600. (Se pone la cinta adhesiva encima del sustrato impreso, y al despegarla, si el *primer* se encuentra bien aplicado, la tinta se queda. Si el primer está mal aplicado, la tinta se despegas del sustrato y se queda en la cinta adhesiva).

*Primer:*

- Principalmente usan los recomendados por los fabricantes de sus imprentas. También usan otra marca de *primer* de producción nacional.

Máquinas para aplicar el *primer*:

- Se indicó que la única que les ha dado buenos resultados es una empresa de origen europeo, líder en el mercado.
- En esta empresa intentaron solucionar el problema de la aplicación del *primer*, desarrollando una máquina con partes de maquinaria vieja que se tenía a la mano. Posteriormente se cotizó el desarrollo de una máquina nueva para la aplicación de *primer*, en 100 mil pesos. Supuestamente no están contentos con los resultados de las soluciones que ellos han desarrollado.

Respuesta ante el proyecto:

- La empresa se mostró interesada en adquirir una máquina integral automática de aplicación de *primer* que les ayude a disminuir las pérdidas.
- La empresa también se mostró muy interesada en adquirir el sistema de calidad para montarlo en sus máquinas, para detectar el momento en el que el *primer* se está aplicado incorrectamente y poder parar el proceso para ajustar la máquina, en tiempo real y en línea.

#### 5.4 Conclusiones

Con los resultados de las tecnologías existentes para la aplicación de *primer* y con los resultados de los cuestionarios aplicados, se concluye que en el mercado existen suficientes soluciones, ya sea en México, Estados Unidos o Europa, para la aplicación del *primer*.

La investigación de la verificación del *primer* en el sustrato tuvo un resultado diferente al de las tecnologías para aplicar el *primer*; el sistema de calidad para la aplicación de *primer* al sustrato ideado para la máquina integral, es una innovación tecnológica, ya que no existe una solución en el mercado que se pueda montar en línea, que esté sensando en todo momento y que alerte al operador para parar a tiempo y hacer ajustes para mejorar la aplicación del *primer* al sustrato.

Dos de las soluciones más comunes que existen en el mercado para la verificación de *primer* en el sustrato, son invasivas y fuera de línea. Éstas son:

- Verificación de la impresión con cinta adhesiva. Se pega y despega una cinta adhesiva en la impresión. Si la tinta se despega junto con la cinta, el *primer* está mal aplicado.
- Líquidos indicadores: se aplica el líquido indicador al sustrato tratado y se espera 30 segundos para notar un cambio en la coloración y se verifica la aplicación de *primer* en el sustrato.

Con estos resultados, el proyecto se centró en el desarrollo un sistema de calidad de la aplicación del *primer* al sustrato, información necesaria para definir los objetivos de la tesis y sus alcances.

## 5.5 Concepto del producto

El sistema de calidad para corroborar la aplicación de *primer* funciona en todo momento. Tiene como entrada el sustrato aplicado con *primer*. Después, un proceso de sensado no invasivo a través de reflexión de luz difusa a todo lo ancho del sustrato. Al final, como salidas, posee: un indicador para el operador, alertándolo cuando el sustrato se encuentra mal tratado para que tenga oportunidad de realizar los ajustes pertinentes; y el mismo sustrato que entró sin recibir alteración alguna.

El sistema debe estar montado en línea en máquinas de impresión o de tratado de sustrato. Al tomar medidas a tiempo se pueden ahorrar horas máquina, humanas y evitar que los trabajos de impresión se atrasen.

## 6. Pruebas preliminares

### 6.1 Pruebas con papel, tinta y *primer*

Aunque el *primer* es un líquido transparente, cuando se aplica al sustrato se nota un cambio en la reflexión de la luz (usando el ojo humano) cuando se compara con el mismo sustrato sin *primer*. Por esta razón, se decidió hacer pruebas de reflexión de luz con el espectrofotómetro Konica Minolta CM 600 D.

Las pruebas se hicieron con:

- Papel couché brillante de  $150 \text{ g/m}^2$
- Un *Primer* de producción mexicana
- Tinta particular de una máquina de *offset* digital.

Se establecieron dos superficies de  $5 \text{ cm} \times 5.5 \text{ cm}$ . En una de las superficies, se aplicó el *primer* de producción mexicana y en la otra sección no se aplicó. Posteriormente, a ambas secciones se les agregó la tinta particular de una máquina de *offset* digital.

Se realizó la prueba de anclaje de la tinta al sustrato con una cinta adhesiva en los dos lados del papel con tinta. Esta prueba se realiza poniendo la cinta encima de la tinta y al despegarla se evalúa si la tinta se queda o no adherida al sustrato.

En la parte del sustrato con *primer* sólo se despegaron los excesos de tinta y en la parte del papel sin *primer*, la tinta se despegó totalmente, como se ve en la figura 6.1.

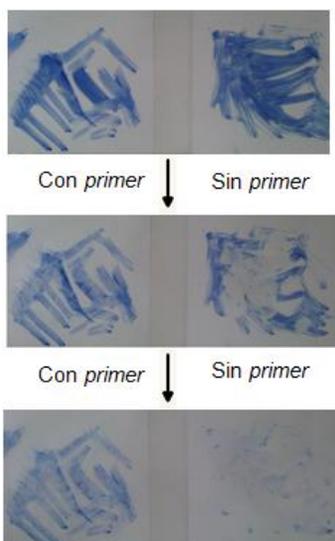


Figura 6.1. Prueba de adhesión de la tinta al sustrato con y sin *primer*.

Estas pruebas no se hicieron con el fin de cuantificar algún resultado, el objetivo fue adquirir experiencia acerca del proceso de aplicación del *primer*. La aplicación de *primer* no fue realizada con los instrumentos adecuados, ni en las cantidades recomendadas por los fabricantes [14].

## 6.2 Espectrofotómetro

El espectrofotómetro usado para los experimentos realizados para esta tesis, mostrado en la figura 6.2, fue el Konica Minolta CM 600 D.



Figura 6.2. Espectrofotómetro Konica Minolta CM 600 D

### 6.2.1 Especificaciones del espectrofotómetro

Para los experimentos realizados durante la elaboración de este proyecto, se asignaron los siguientes valores a los parámetros del espectrofotómetro.

- Modo de componente especular: SCE
- Número de promediación automática: 1
- Tipo de exhibición: Absoluta
- Espacio de color: L\*a\*b\*
- Ángulo del Observador: 10°
- Iluminante 1: D65

El modo de componente especular para la experimentación se fijó en SCE (*specular component excluded*), ya que, en comparación con el otro modo de componente especular, SCI (*specular component included*) es el parámetro que presentó el mayor cambio al comparar la reflexión del sustrato con *primer* y sin *primer*.

Los demás parámetros, asignados por default, del espectrofotómetro se pueden consultar en su manual de operación [15].

### 6.2.2 Iluminante

El estándar internacional para los estándares del color para las industrias de tecnologías gráficas y fotografía es el ISO 3664:2009 [16]. El iluminante usado para este estándar es el D50. La temperatura de color del iluminante D50 es 5003 K.

Para estos experimentos se usó el iluminante D65. Su temperatura de color es 6504 K. El estándar de tecnologías gráficas donde se usa este iluminante es el ISO 2846 [17] que está relacionado con el color y la transparencia de las tintas.

Se usó el iluminante D65 en vez del D50 porque se partió del principio de que el cambio de la reflexión de la luz del sustrato con *primer* se notaba con el ojo humano en condiciones ambientales. La temperatura de color del sol es de 6000 K, por eso se usó el iluminante D65 (6004 K).

### 6.3 Pruebas con espectrofotómetro

Antes de realizar las pruebas con el espectrofotómetro, se le aplicó *primer* a diferentes superficies de 5 cm x 5.5 cm del couché brillante.

La cantidad de *primer* por área fue medida únicamente en gotas. Se debe tener en cuenta que el objetivo de estas pruebas fue adquirir experiencia en la manera en que el *primer* modifica la reflexión de la luz cuando se encuentra aplicado en el sustrato.

Se aplicaron 4 diferentes concentraciones de *primer* sobre el área de control de 5 cm x 5.5 cm

Con estas superficies, se hicieron pruebas con el espectrofotómetro para identificar algún parámetro de sensado que presentara una diferencia considerable al ser comparado entre la medición del sustrato con *primer* y sin *primer*.

Después de probar con diferentes parámetros de sensado que ofrece el espectrofotómetro, se observó una diferencia en la reflexión de la luz. La medición de la reflexión de la luz en el espectrofotómetro tiene dos opciones: incluir la componente especular o excluir la componente especular.

El tipo de medición en el que se observa un mayor cambio al comparar la reflexión del sustrato con *primer* y sin *primer*, fue el SCE (*specular component excluded*), que excluye la componente especular y mide solamente la reflexión de luz difusa.

	Nombre datos	Patrón núm.	dE*ab(A)	Evaluación	L*(A)	a*(A)	b*(A)	dL*(A)	da*(A)	db*(A)
Patrón	couche 150 sin tratar	-----	-----	-----	93.28	0.00	-4.12	-----	-----	-----
		-----	-----	-----	92.77	0.00	-4.31	-----	-----	-----
1	4-	1	0.15	PASS	93.13	0.00	-4.10	-0.15	-0.00	0.02
		1	0.46	PASS	92.31	-0.00	-4.32	-0.46	-0.01	-0.01
2	4	1	0.29	FAIL	92.99	-0.00	-4.13	-0.29	-0.01	-0.01
		1	1.06	FAIL	91.72	0.04	-4.31	-1.06	0.04	-0.00
3	5	1	0.29	FAIL	93.01	0.01	-4.00	-0.27	0.00	0.12
		1	1.00	FAIL	91.78	0.03	-4.19	-1.00	0.03	0.12
4	6	1	0.26	Aviso	93.03	0.03	-4.05	-0.25	0.03	0.07
		1	0.74	Aviso	92.03	0.05	-4.25	-0.74	0.04	0.06

Figura 6.3. Mediciones del espectrofotómetro

En la figura 6.3 se ven las mediciones del espectrofotómetro en el modelo de color  $L^*a^*b^*$ . El espectrofotómetro tiene la opción de proporcionar los datos absolutos o en diferencias o *deltas*, cuando se comparan los valores obtenidos contra el de un valor patrón.

En este caso, se estableció como patrón una medición del sustrato sin *primer* y se comparó contra las mediciones del espectrofotómetro en las áreas controladas con diferentes concentraciones de *primer*.

Las diferentes concentraciones se pueden observar en la columna “Nombre de datos” y son: 4-, 4, 5 y 6. Cada concentración consta de dos renglones, uno correspondiente a cada tipo de medición de reflexión de luz: al primer renglón le corresponde *SCI* (*specular component included*) y al segundo renglón *SCE*.

El cambio más grande de los datos mostrados en la figura 6.3, se muestra encerrado en un círculo rojo y corresponde al valor de la diferencia de la luminancia. Esa medición encerrada en el círculo rojo, corresponde al renglón de SCE de cada concentración de *primer*.

Al igual que las pruebas con el sustrato y el *primer* de producción nacional, estas pruebas no se hicieron con el fin de cuantificar algún resultado. El objetivo fue adquirir experiencia y poder comparar las propiedades reflexivas que tiene el *primer* cuando se encuentra aplicado en el sustrato.

### 6.3.1 Principio de funcionamiento

En el espectrofotómetro se puede establecer una tolerancia en la diferencia de algún parámetro al momento de comparar cada muestra contra el patrón. Como se puede ver en la columna de “Evaluación” de la figura 6.3, si el valor de la diferencia es menor al de la tolerancia, el valor de esa muestra pasa (*PASS*). Si el valor de la diferencia es mayor a la tolerancia, el valor de esa muestra falla (*FAIL*).

Con esta evaluación se define el principio de funcionamiento del sistema (figura 6.4): si el sustrato se encuentra aplicado correctamente con *primer*, pasa. Si la aplicación del *primer* al sustrato es incorrecta, el sistema manda una alerta de falla.



Figura 6.4. Principio de funcionamiento del sistema de calidad de aplicación de *primer* al sustrato

## 6.4 Pruebas con sensores industriales

### 6.4.1 Investigación de mercado

Con los resultados de las pruebas del couché con el *primer* de producción nacional, se decidió intentar solucionar el problema del sensado de la presencia de *primer* en el sustrato, midiendo la reflexión difusa de la luz.

Se hizo una investigación de mercado de los sensores de reflexión de luz difusa que existen en la industria y sus proveedores nacionales. El tipo de iluminante, sensibilidad de calibración, salida de transistor, rango de operación y precio no se tomaron en cuenta como un filtro para buscar sensores. Estos factores no han sido analizados y no se sabe en qué magnitud influyen en la medición de la reflexión de la luz del sustrato con y sin *primer*.

Se encontraron 37 empresas que cuentan con sensores de medición de reflexión de luz difusa, de las cuales 27 fueron contactadas con el fin de conseguir alguna colaboración para el proyecto.

## 6.4.2 Pruebas

De las 27 empresas contactadas, una empresa distribuidora de una compañía líder en el mercado de la automatización, colaboró en la investigación prestando algunos sensores *demo* para hacer las pruebas de reflexión del sustrato. Las especificaciones de estos sensores son:

Sensor	1	2	3	4
Tipo de sensado	<i>Standard diffuse</i>	<i>Background suppression</i>	<i>Standard diffuse</i>	<i>Background suppression</i>
Iluminante	645 nm	880 nm	880 nm	880 nm
Distancia	3-800 mm	3-100 mm	0-1 m	20-300 mm
Calibración	<i>Pot.</i>	-	<i>Pot. single turn</i>	<i>Pot.</i>
Función de salida	<i>Complementary light/ Dark operate</i>	<i>Light operate</i>	<i>Light operate/ Dark operate</i>	<i>Light operate</i>
Tipo de salida	PNP	NPN/PNP	PNP	NPN/PNP
Ángulo	4°	8°/20°	-	-

Tabla 6.1. Características de los sensores de demostración de la empresa distribuidora.

Uno de los objetivos de las pruebas de reflexión en el sustrato con *primer* y sin *primer*, usando sensores industriales de luz difusa, fue emular el comportamiento del espectrofotómetro ajustado con una tolerancia, que te da como salida un mensaje que te indica si en el sustrato se encuentra aplicado o no el *primer*.

Se hicieron las pruebas con los sensores 1, 2 y 4 en un banco de prueba donde se varió la altura entre el sensor y el sustrato, y de ser posible, la calibración del sensor.

No se pudo lograr que los sensores 1 y 2 sensaran la diferencia en la reflexión de la luz entre el sustrato con *primer* y el sustrato sin *primer*. El sensor 4 pudo sensar satisfactoriamente la diferencia de la reflexión de luz del sustrato con y sin *primer*, emulando el principio de operación del espectrofotómetro, con la diferencia que la alerta del sensor se prende al medir la reflexión de luz del sustrato con *primer* y se apaga al medir la reflexión del sustrato sin *primer*, como se ve en la figura 6.5.

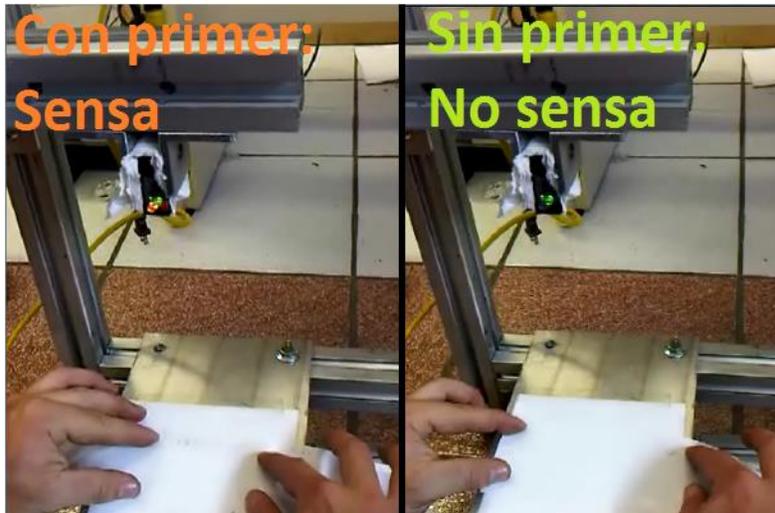


Figura 6.5. Se realizaron pruebas con el sensor 4. Del lado izquierdo se sensa el sustrato con *primer* y se activa el sensor. Del lado derecho se sensa el sustrato sin *primer*, el valor de la luz reflejada no fue suficiente para activar la alerta del sensor.

### 6.4.3 Conclusiones

El otro objetivo de las pruebas con sensores industriales, fue adquirir experiencia del comportamiento de los sensores ante el reto de sensar la presencia de *primer* en el sustrato, ya que estos sensores están diseñados para cumplir otras funciones, como la presencia o ausencia de objetos en una línea de producción.

Estas pruebas no se hicieron con el fin de cuantificar algún resultado. La aplicación de *primer* no fue realizada con los instrumentos adecuados, ni en las cantidades recomendadas por los fabricantes [14].

También se ignoraron los factores que pueden interferir con la medición de los sensores. Estos factores se toman en cuenta en el diseño de los experimentos que se encuentran en el siguiente capítulo de esta tesis.

## 7. Diseño de experimentos

En sentido literal, un experimento es una prueba. Desde una perspectiva más formal, un experimento es una prueba o serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema para observar e identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida.

El diseño de los experimentos diseñados y analizados en esta investigación, se basó en las pautas generales para diseñar un experimento, figura 7.1, del libro de Diseño y Análisis de Experimentos, de Douglas C. Montgomery [18].

---

<ol style="list-style-type: none"><li>1. Identificación y exposición del problema.</li><li>2. Elección de los factores, los niveles y los rangos.<sup>a</sup></li><li>3. Selección de la variable de respuesta.<sup>a</sup></li><li>4. Elección del diseño experimental.</li><li>5. Realización del experimento.</li><li>6. Análisis estadístico de los datos.</li><li>7. Conclusiones y recomendaciones.</li></ol>	】 Planeación previa al experimento
---	------------------------------------

---

Figura 7.1 [18]. Pautas generales para diseñar un experimento.

### 7.1 Identificación y exposición del problema

La problemática del proyecto está identificada: la aplicación del *primer* al sustrato falla constantemente. Debido a esto se generan pérdidas en las imprentas y sus industrias conexas, la industria del papel y en los productores de sustrato.

Al realizar los estudios de mercado con las imprentas acerca de los problemas que tienen a raíz de las fallas del proceso de aplicación de *primer* al sustrato, y de las investigaciones del estado del arte y de las tecnologías existentes, el objetivo de la tesis se centró en la búsqueda de un parámetro de medición para poder diferenciar al sustrato aplicado con *primer* del sustrato sin aplicación de *primer* y el alcance del proyecto se definió como el desarrollo de un sistema de calidad de aplicación de *primer* al sustrato usando reflexión de luz difusa, el cual sería una innovación tecnológica.

Para cumplir con los objetivos y sentar las bases del desarrollo del producto, se necesita experimentar y analizar, de manera iterativa, diferentes etapas del proyecto. Estas etapas son:

- La aplicación del primer al sustrato
- Identificación de los parámetros de reflexión con el espectrofotómetro
- Medición de la reflexión con sensores industriales
  - Sensar la reflexión de la luz del sustrato con el sustrato en movimiento

Para cubrir con todas las etapas del proyecto, se propusieron diferentes experimentos. Cada experimento tiene diferentes factores, niveles, rangos y variables de entrada y salida, pero están relacionados entre sí. Por ejemplo, no se pueden identificar los parámetros de reflexión del sustrato si no se ha validado la aplicación del primer al sustrato y no se puede sensor el sustrato en movimiento si no se han encontrado los sensores adecuados para medir la diferencia de reflexión entre el sustrato con *primer* y sin *primer*.

Considerando los primeros 3 puntos de la tabla figura 7.1, los experimentos propuestos son:

## 7.2 Primer experimento: Aplicación del *primer* al sustrato

El objetivo de este experimento es validar la aplicación del *primer* en el sustrato. En la figura 7.2 se muestran las entradas en amarillo, el tipo de sustrato y la cantidad de *primer* que se le va a aplicar. El área de control del sustrato para las mediciones y experimentos se encuentra en el anexo 5. Los factores controlables están escritos de color verde en la parte superior del proceso de aplicación de *primer*. En la parte posterior, en magenta, se encuentran los factores no controlables que pueden afectar el proceso de la aplicación del *primer*. De negro, están las variables de salida. Éstas son, la prueba cualitativa de la adherencia de tinta con una cinta adhesiva y el valor de la luminancia ( $L^*$ ) medida con el espectrofotómetro.

La asignación inconclusa de los niveles, rangos de las variables de entrada, factores controlables, factores no controlables y variables de salida, se encuentra en el anexo 6.

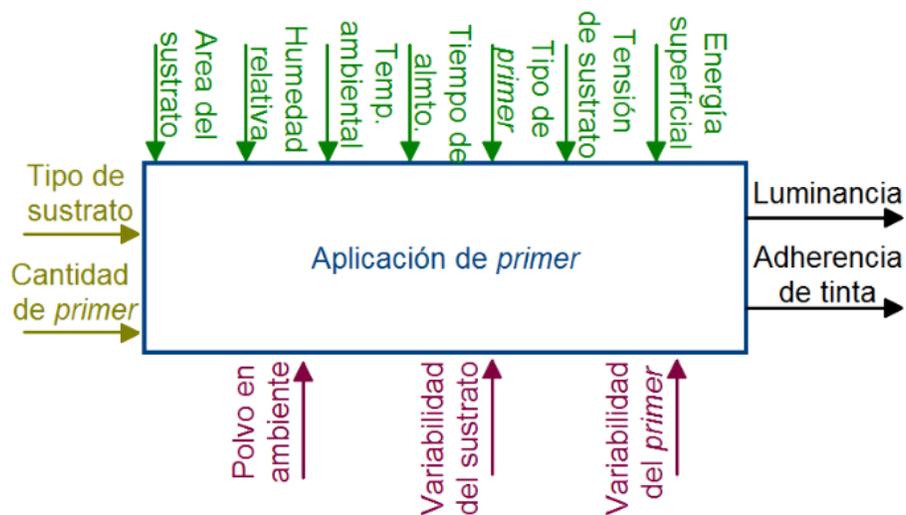


Figura 7.2. Diagrama del experimento para validar la aplicación de *primer* al sustrato

Para realizar este experimento se necesita colaboración de alguna empresa que cuente con alguna máquina con una estación de flexografía para poder aplicar el *primer* y tomar en cuenta las especificaciones del fabricante para la aplicación del primer al sustrato [20].

### 7.3 Segundo experimento: Medición de la reflexión de la luz difusa usando sensores industriales

Este experimento sirve para encontrar la altura a la que debe estar el sensor industrial de luz difusa que pueda medir la diferencia de la reflexión en el sustrato con *primer* y sin *primer*.

En la figura 7.3 se muestran las entradas en amarillo, el tipo de sensor, la altura del sensor y las muestras del sustrato con *primer* y sin *primer*. Los factores controlables están escritos de color verde en la parte superior del proceso de la medición de la reflexión de luz en el sustrato. En la parte posterior, en magenta, se encuentran los factores no controlables que pueden afectar el proceso de la medición de la reflexión. De negro, están las variables de salida. Éstas son, la señal analógica o digital de salida del sensor y alguna alerta visual o sonora.

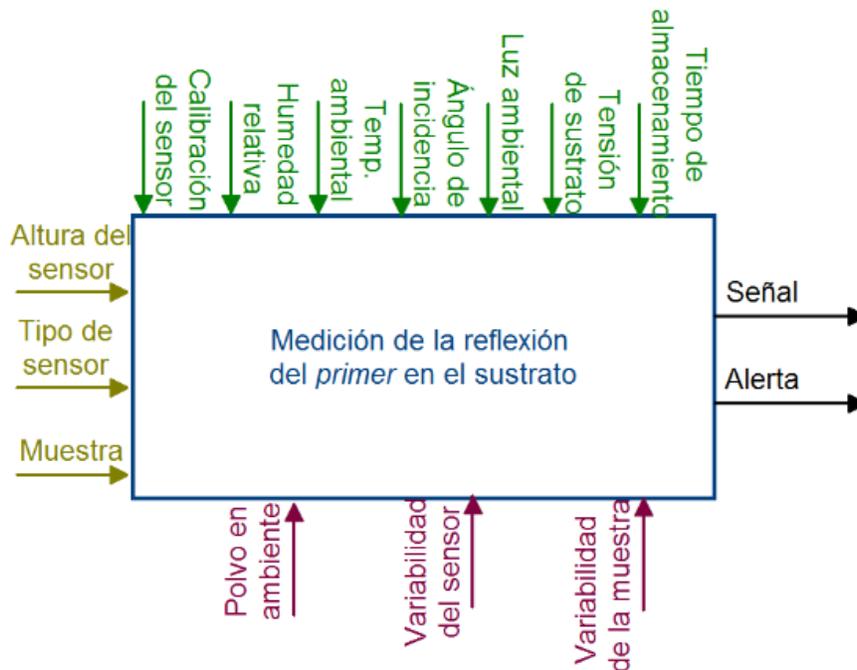


Figura 7.3. Diagrama del experimento para medir la reflexión del sustrato

La asignación inconclusa de los niveles, rangos de las variables de entrada, factores controlables, factores no controlables y variables de salida, se encuentra en el anexo 7.

## 7.4 Banco de pruebas

La altura entre el sensor y el sustrato se puede ajustar de manera general y de manera fina. Para ajustar distancias grandes, se modifica la distancia del perfil de aluminio donde se encuentra el órgano terminal, para medidas pequeñas que requieren exactitud se ajusta el tornillo que contiene a nuestro órgano terminal.

El órgano terminal es una pinza que permite modificar el ángulo de incidencia del sensor sobre un plano perpendicular al sustrato.

El sustrato se posiciona por debajo de una lámina de aluminio. Esta lámina tiene un hoyo en donde se toma la medición de la reflexión del sustrato y al mismo tiempo ayuda a estirar el sustrato para que quede paralelo a la base y facilite ajustar su tensión.

La dimensión de 37.5 cm, visto en la figura 7.4, se estableció para cumplir con el ancho del papel común de las máquinas de *offset* digital, de 13”.

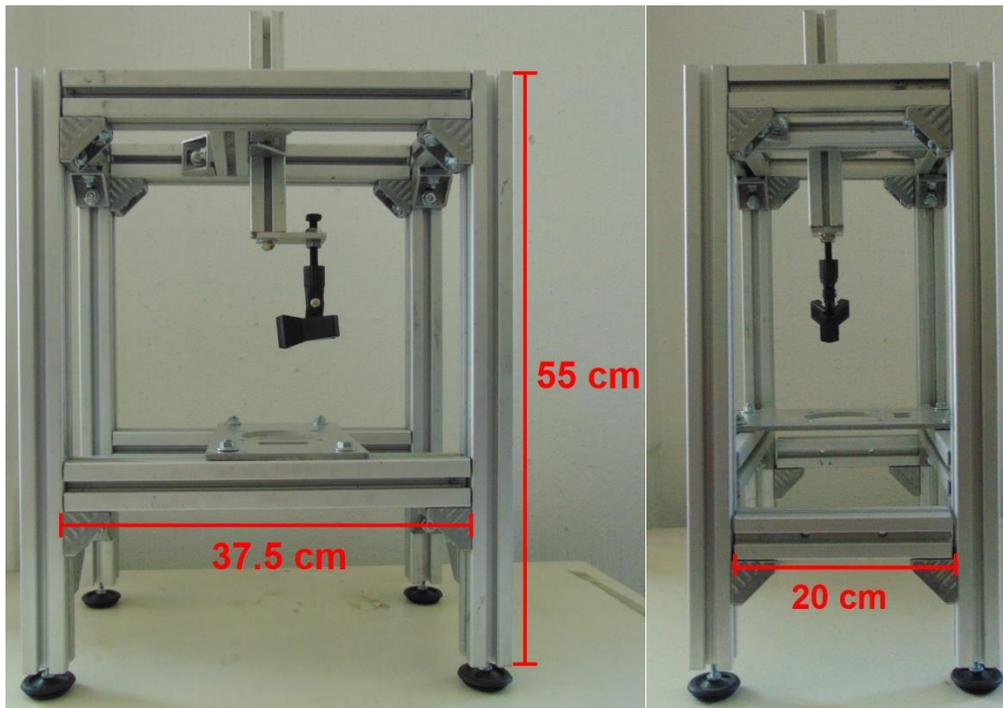


Figura 7.4. Dimensiones del banco de pruebas

### **7.5 Tercer experimento: Medición con el sustrato en movimiento**

El objetivo de este experimento es encontrar la velocidad de traslado del sustrato en la que el sensor, identificado en el experimento anterior, puede medir la diferencia de la reflexión de luz entre el sustrato con *primer* y sin *primer*.

Los niveles y rangos de las variables de entrada, factores controlables, factores no controlables y variables de salida, no han sido establecidos para este experimento y se considera como trabajo a futuro.

### **7.6 Conclusiones**

Ante la problemática de la maquinaria requerida para la realización del primer experimento, se buscó trabajar con alguna empresa interesada en el proyecto.

En paralelo con la búsqueda de un compañero para la realización del primer experimento, se construyó un banco de pruebas que permitiera ajustar la altura del sensor, establecer el ángulo de incidencia, modificar la tensión del sustrato y realizar las mediciones, condiciones necesarias para poder llevar a cabo el segundo experimento.

La sede en México de la empresa Avery Dennison S.A de C.V., estuvo interesada en colaborar con el proyecto del *sistema de calidad para la aplicación del primer al sustrato usando reflexión de luz difusa*. Contribuyeron con muestras de sustrato con y sin *primer*, haciendo el primer experimento mucho más sencillo de diseñar y realizar.

## 8. Realización de los experimentos

Para poder llevar a cabo los experimentos, además de encontrar una empresa que estuviera dispuesta a colaborar con la maquinaria adecuada para realizar el primer experimento para validar la aplicación del *primer* en el sustrato, fue necesario conseguir muestras de sustrato con el cual experimentar.

A la empresa Avery Dennison S.A. de C.V. le interesó colaborar en el proyecto facilitando muestras del sustrato sin *primer* y muestras del sustrato pretratado con *primer*, haciendo más fácil la obtención de los resultados del experimento de la sección 7.2 “Primer experimento: Aplicación del *primer* al sustrato”, eliminando la parte dedicada a la aplicación del *primer*, redirigiendo el enfoque únicamente en la obtención de parámetros de reflexión con el espectrofotómetro.

### 8.1 Sustratos

La empresa dio 3 pares de bobinas de sustrato. Cada par consiste del mismo tipo de sustrato, pero una de las muestras por cada par, se encuentra pretratada con *primer*. Los sustratos son: BOPP (*bi-oriented polypropelene*) blanco, BOPP metalizado y Estate Label. Los detalles de los sustratos se pueden ver en la tabla 8.1.

	Tipo	Clave	Descripción	Tamaño
<b>BOPP blanco</b>	Sin <i>primer</i>	78333	2.3M white BOPP TC/S692N/40#BG	6'' x 500'
	Con <i>primer</i>	78659	2.3M white BOPP ITC/S692N/40#BG	12'' x 500'
<b>BOPP metalizado</b>	Sin <i>primer</i>	77036	2M Metallized BOPP TC/S692N/40#BG	6'' x 500'
	Con <i>primer</i>	78771	2 Mil Metallized BOPP ITC/S692N/40#BG	12'' x 500'
<b>Estate Label</b>	Sin <i>primer</i>	01533	Estate Label #4/S100R/44#PK	6'' x 500'
	Con <i>primer</i>	19991	Estate Label® No. 4 ITC /S100R/44#PK	12'' x 500'

Tabla 8.1. Sustratos

Los primeros 100 metros de cada bobina se cortaron en 100 hojas de un metro de longitud cada una, como se ve en la figura 8.1.



Figura 8.1. Corte de las bobinas de sustrato en hojas.

Las 100 hojas de cada sustrato y los metros restantes, conservados en bobina, se almacenaron en una caja cerrada protegida de los factores ambientales, como se ve en la figura 8.2.



Figura 8.2. Almacenamiento del sustrato.

## 8.2 Diseño del experimento

El objetivo de este experimento es conocer si la presencia del *primer* en el sustrato influye en su reflexión de luz difusa.

Se comparará la reflexión de luz difusa del sustrato sin *primer* y el sustrato con *primer* a través de una estimación de sus medias poblacionales del valor de la luminancia ( $L^*$ ) inferida del muestreo realizado con el espectrofotómetro Konica Minolta CM 600 D.

La hipótesis que se busca rechazar es:

$$\mu_{L_{con\ primer}} - \mu_{L_{sin\ primer}} = 0$$

En la figura 8.3 se ven de color verde los factores controlables. La influencia del área del sustrato, la calibración del espectrofotómetro y el tiempo de almacenamiento sobre la variación de las mediciones fueron despreciadas para este experimento. Para escoger la base en la que se tomarían las mediciones, se hicieron pruebas con 3 tipos de cartones diferentes y una base de estireno blanco. La base de estireno blanco fue la que se usó para tomar las mediciones en este experimento.

Para intentar minimizar el efecto de la luz ambiental en las mediciones, los experimentos se realizaron de noche y con las luces de los alrededores apagadas. Los demás factores no controlables ven de color magenta.

Las variables de entrada del proceso de medición de la reflexión de la luz se encuentran de color amarillo y de negro las variables de salida, en este caso la luminancia ( $L^*$ ).

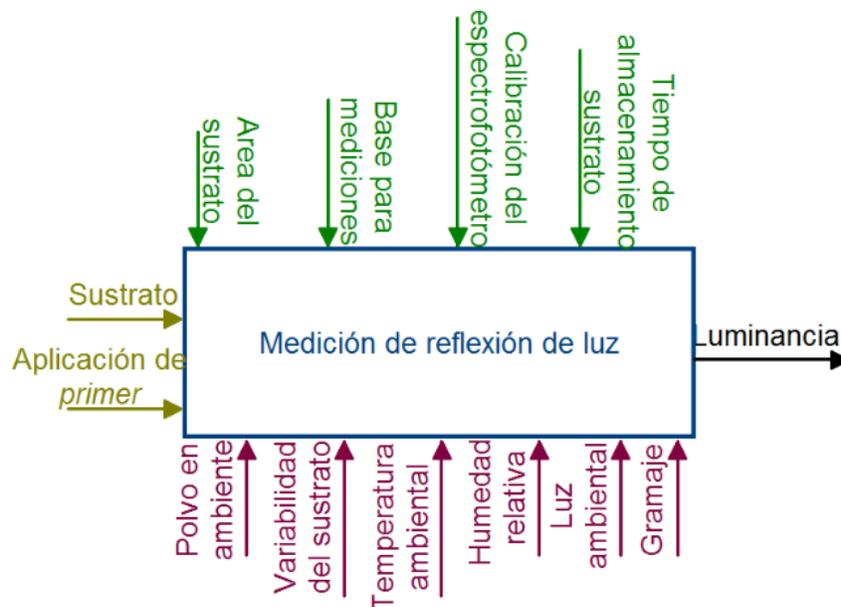


Figura 8.3. Variables de entrada, factores controlables, factores no controlables y variable de salida del proceso de medición de la reflexión de luz en el sustrato.

### 8.2.1 Inferencia estadística

El valor del error máximo permitido de la diferencia de las medias se establece a partir del valor de su desviación estándar y de su intervalo de confianza.

Para calcular la desviación de la ecuación 8.1, se necesita tener un valor aproximado de la desviación poblacional de la luminancia del sustrato con *primer* y sin *primer* dividido entre el número de muestras tomadas.

$$\sigma_{(\bar{y}_{sp} - \bar{y}_{cp})} = \sqrt{\frac{\sigma_{sp}^2}{n_{sp}} + \frac{\sigma_{cp}^2}{n_{cp}}}$$

Ecuación 8.1.

Para tener un valor aproximado de la desviación poblacional de la luminancia se tomaran 50 mediciones con el espectrofotómetro de una de hoja de cada sustrato con *primer* y 50 mediciones de una hoja de cada sustrato sin *primer*.

Al tomar estas mediciones preliminares, también se puede tener un valor aproximado del error máximo aceptable y de la desviación estándar de la diferencia de las medias.

Con todos estos valores aproximados, el único valor que faltante es el de  $n$ . Es decir, con el intervalo de confianza deseado, el valor aproximado de la desviación de la diferencia de las medias, el valor aproximado de la desviación de la media con primer y el valor aproximado de la desviación de la media sin primer, se calcula  $n$ , el número de muestras necesarias para validar nuestros valores aproximados establecidos.

### 8.3 Resultado de los experimentos con base de estireno, de noche

#### 8.3.1 BOPP blanco

Con el resultado de las 50 mediciones preliminares del sustrato con *primer* y 50 del sustrato sin *primer*, se establecen los intervalos de confianza en 80.3% para la distribución normal del sustrato con *primer* y sin *primer*. El valor de  $z_{\alpha/2}$  que incluye aproximadamente 80.3% de las muestras es 1.29. Por lo tanto, el intervalo de confianza es  $\bar{y} \pm 1.29 s_{\bar{y}}$ . Los resultados se ven en la tabla 8.2.

	$\mu$	$s_{\bar{y}}$	LCI	LCS
<b>Sin primer</b>	93.7716	0.027448862	93.73619097	93.80700903
<b>Con primer</b>	93.6848	0.035678565	93.63877465	93.73082535

Tabla 8.2. Resultados de las 50 muestras preliminares del sustrato con *primer* y sin *primer*

Las gráficas de la distribución normal de la media de la luminancia de la reflexión de luz difusa y los límites de confianza del sustrato con y sin *primer*, se ven en la figura 8.4.

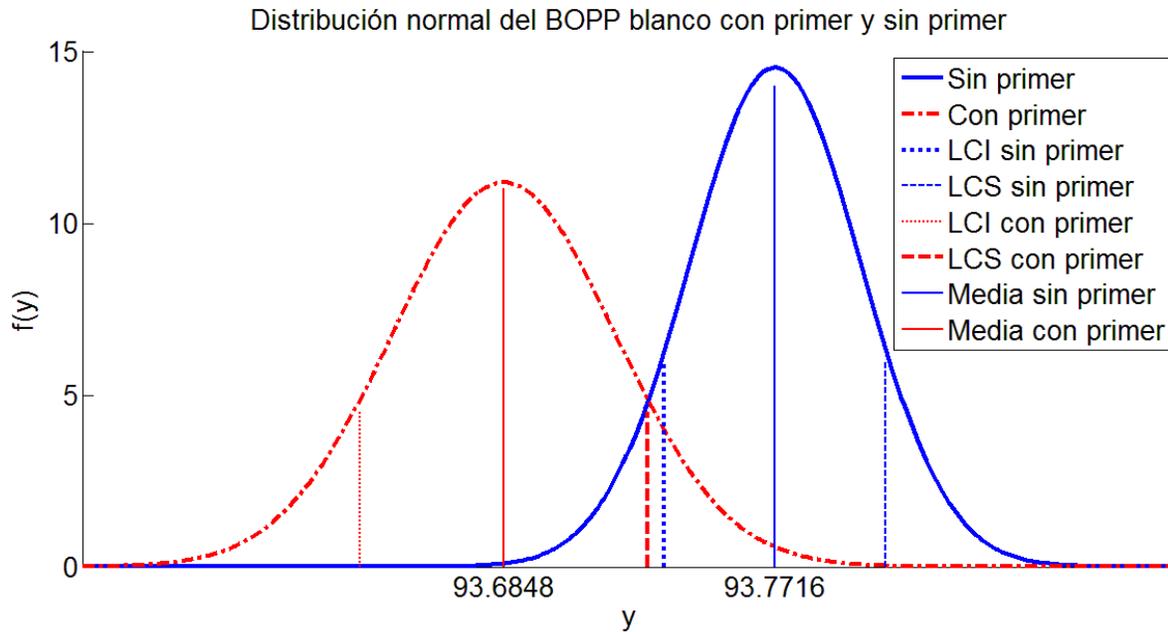


Figura 8.4. Distribución de probabilidad del sustrato con y sin *primer* de las muestras preliminares.

El valor de la diferencia de las medias es:

$$93.7716 - 93.6848 = .0868$$

Este valor se establece de la diferencia entre el límite de confianza inferior del sustrato sin primer y el límite de confianza superior del sustrato sin primer. Este valor se iguala a  $2\sigma$  con una probabilidad de .95.

$$2\sigma = 93.73619097 - 93.73082535 = 0.00536562$$

La gráfica de la distribución normal de la desviación de la diferencia de medias y sus límites de confianza, se ve en la figura 8.5.

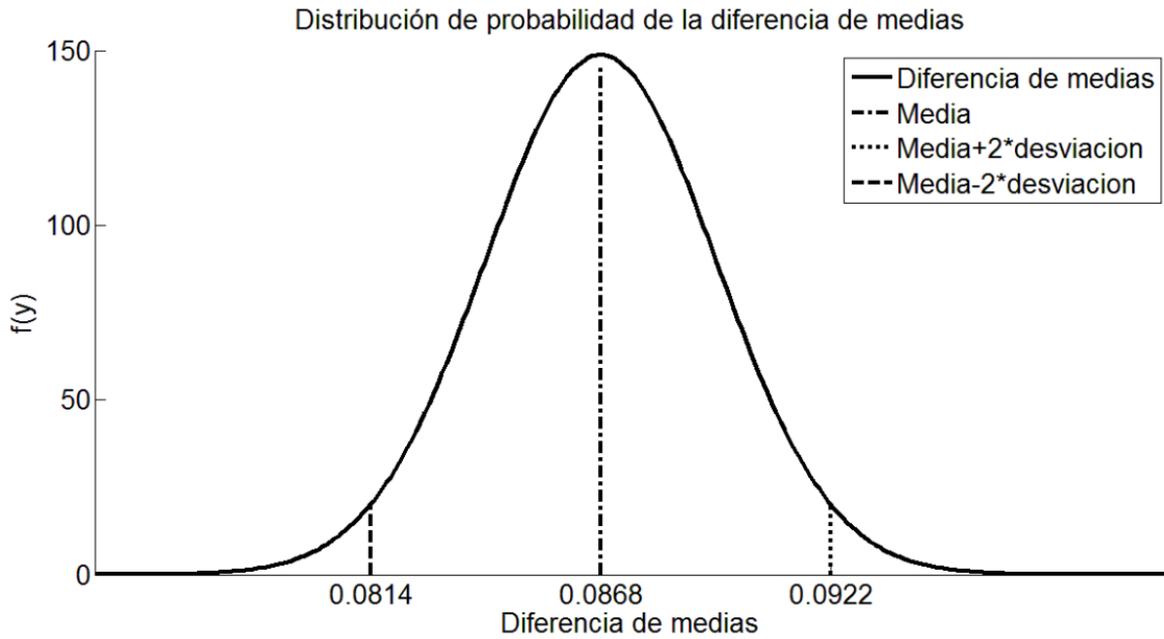


Figura 8.5. Desviación de la probabilidad de la diferencia de medias

Esto significa que si el valor de la diferencia es menor a .0814, los valores de  $LCI_{Sin primer}$  y  $LCS_{Con primer}$  con una probabilidad de 80.3% se encimarían, haciendo imposible de distinguir a dónde pertenecería (con su probabilidad) una medición de caer en la intersección de los límites de confianza.

Para calcular el tamaño de la muestra se debe tener un estimado de las desviaciones de ambas medias así como la desviación de la diferencia de las medias que se acaba de estimar.

La magnitud de la desviación de la diferencia de las medias se justifica en el inciso anterior:

$$2\sigma_{(\bar{y}_{Sin primer} - \bar{y}_{Con primer})} = 0.00536562$$

Se tiene:

$$\sigma_{\bar{y}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Entonces:

$$\sigma_{(\bar{y}_{sp}-\bar{y}_{cp})} = \sqrt{\frac{\sigma_{sp}^2}{n_{sp}} + \frac{\sigma_{cp}^2}{n_{cp}}}$$

Se iguala el valor máximo aceptable estimado a la desviación muestral:

$$2\sigma_{(\bar{y}_{sp}-\bar{y}_{cp})} = 2\sqrt{\frac{\sigma_{sp}^2}{n_{sp}} + \frac{\sigma_{cp}^2}{n_{cp}}} = 0.00536562$$

Se establece que  $n_{sp} = n_{cp} = n$ .

$$2\sqrt{\frac{\sigma_{sp}^2}{n} + \frac{\sigma_{cp}^2}{n}} = 0.00536562$$

Se despeja  $n$ :

$$\frac{\sigma_{sp}^2 + \sigma_{cp}^2}{n} = \left(\frac{0.00536562}{2}\right)^2$$

$$n = \frac{4(\sigma_{sp}^2 + \sigma_{cp}^2)}{0.00536562^2}$$

Para estimar  $n$  (número de muestras) se tiene que dar un valor estimado de las desviaciones poblacionales del sustrato con *primer* y sin *primer*.

Estas desviaciones se tienen que establecer según alguna experiencia en el tema. En este caso se van a tomar las desviaciones muestrales calculadas del resultado de las 50 muestras tomadas con el espectrofotómetro de la reflexión del sustrato con *primer* y sin *primer*.

$$\sigma_{sp} = s_{sp} = 0.027448862$$

$$\sigma_{cp} = s_{cp} = 0.035678565$$

Se calcula  $n$ :

$$n = \frac{4(0.027448862^2 + 0.035678565^2)}{0.00536562^2} = 281.5434197$$

$$n = 282$$

### 8.3.2 BOPP Metalizado

Con el resultado de las 50 mediciones preliminares del sustrato con *primer* y 50 del sustrato sin *primer*, se establecen los intervalos de confianza en 99% para la distribución normal del sustrato con *primer* y sin *primer*. El valor de  $z_{\alpha/2}$  que incluye aproximadamente 99% de las muestras es 2.58. Por lo tanto, el intervalo de confianza es  $\bar{y} \pm 2.58s_{\bar{y}}$ . Los resultados se ven en la tabla 8.3.

	$\mu$	$s_{\bar{y}}$	LCI	LCS
<b>Sin primer</b>	23.8116	0.547617969	22.39874564	25.22445436
<b>Con primer</b>	27.0092	0.475730344	25.78181571	28.23658429

Tabla 8.3. Resultados de las 50 muestras preliminares del sustrato con *primer* y sin *primer*

Las gráficas de la distribución normal de las media de la luminancia de la reflexión de luz difusa y los límites de confianza del sustrato con y sin *primer*, se ven en la figura 8.6.

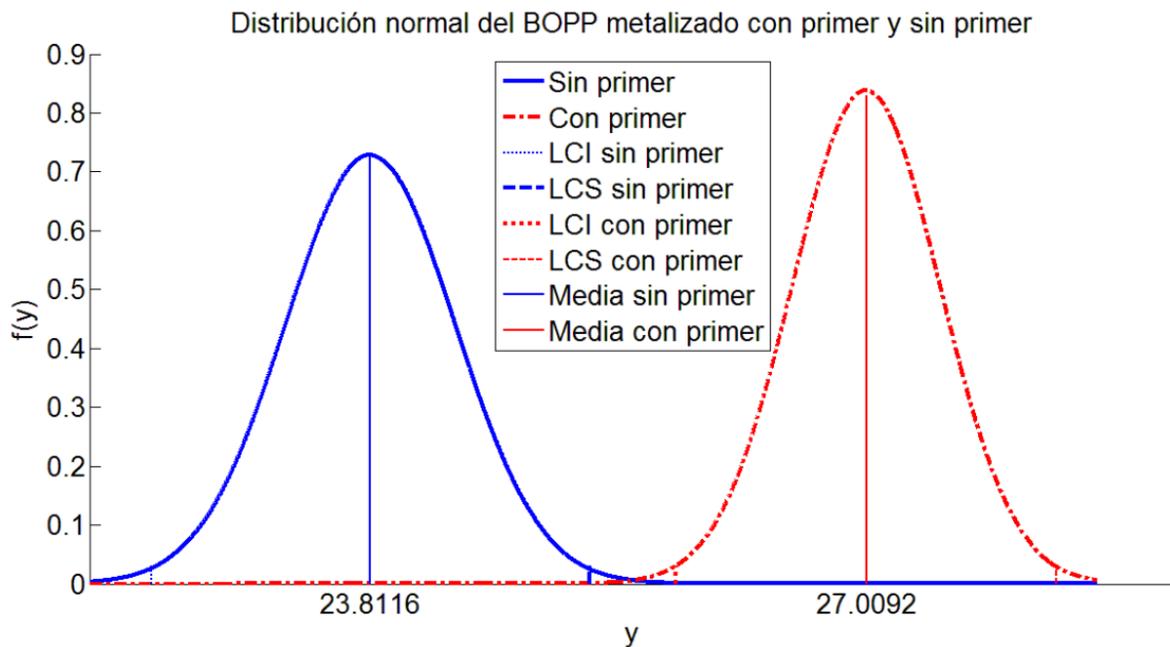


Figura 8.6. Distribución de probabilidad del BOPP metalizado con y sin *primer*

El valor de la diferencia de las medias es:

$$27.0092 - 23.8116 = 3.1976$$

Este valor se establece de la diferencia entre el límite de confianza inferior del sustrato sin primer y el límite de confianza superior del sustrato sin primer. Este valor se iguala a  $2.58\sigma$  con una probabilidad de .99.

$$2.58\sigma = 25.78181571 - 25.22445436 = 0.557361353$$

La gráfica de la distribución normal de la desviación de la diferencia de medias y sus límites de confianza, se ve en la figura 8.7.

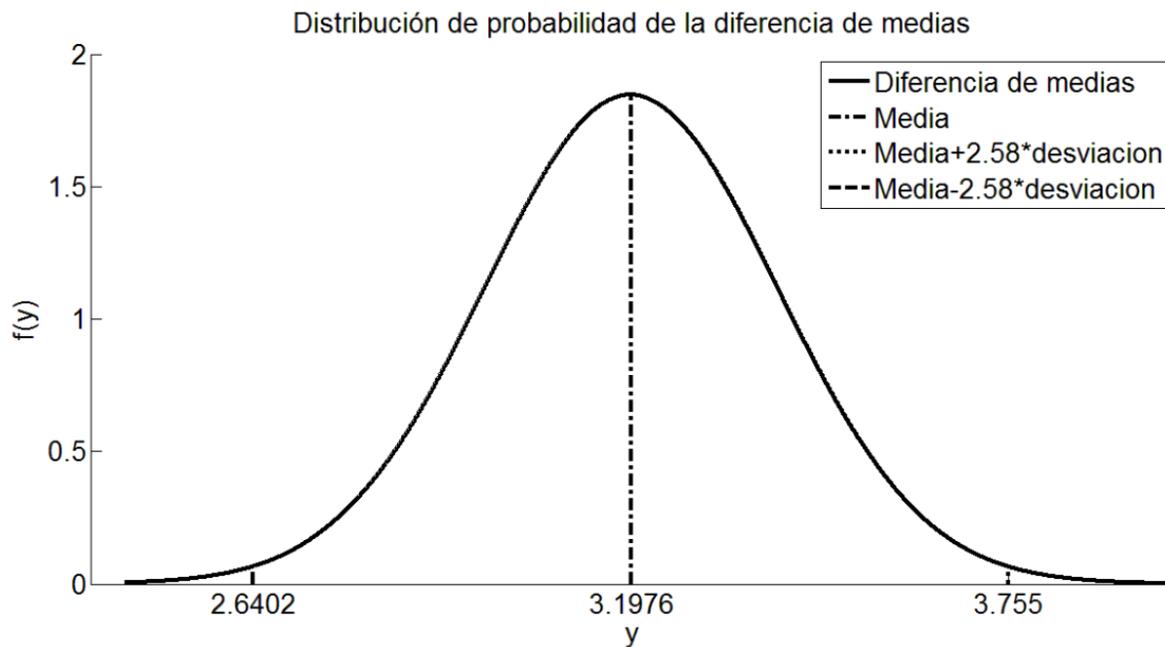


Figura 8.7. Desviación de la probabilidad de la diferencia de medias

Esto significa que si el valor de la diferencia es menor a 2.6402, los valores de  $LCI_{Con primer}$  y  $LCS_{Sin primer}$  con una probabilidad de 99% se encimarían, haciendo imposible de distinguir a dónde pertenecería (con su probabilidad) una medición de caer en la intersección de los límites de confianza.

Para calcular el tamaño de la muestra se debe tener un estimado de las desviaciones de ambas medias así como la desviación de la diferencia de las medias que se acaba de estimar.

La magnitud de la desviación de la diferencia de las medias se justifica en el inciso anterior:

$$2.58\sigma_{(\bar{y}_{Sin\ primer} - \bar{y}_{Con\ primer})} = 0.557361353$$

Se tiene:

$$\sigma_{\bar{y}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Entonces:

$$\sigma_{(\bar{y}_{sp} - \bar{y}_{cp})} = \sqrt{\frac{\sigma_{sp}^2}{n_{sp}} + \frac{\sigma_{cp}^2}{n_{cp}}}$$

Se iguala el valor máximo aceptable estimado a la desviación muestral:

$$2.58\sigma_{(\bar{y}_{sp} - \bar{y}_{cp})} = 2.58 \sqrt{\frac{\sigma_{sp}^2}{n_{sp}} + \frac{\sigma_{cp}^2}{n_{cp}}} = 0.557361353$$

Se establece que  $n_{sp} = n_{cp} = n$ .

$$2.58 \sqrt{\frac{\sigma_{sp}^2}{n} + \frac{\sigma_{cp}^2}{n}} = 0.557361353$$

Se despeja  $n$ :

$$\frac{\sigma_{sp}^2 + \sigma_{cp}^2}{n} = \left(\frac{0.557361353}{2.58}\right)^2$$

$$n = \frac{6.6564(\sigma_{sp}^2 + \sigma_{cp}^2)}{0.557361353^2}$$

Para estimar  $n$  (número de muestras) se tiene que dar un valor estimado de las desviaciones poblacionales del sustrato con *primer* y sin *primer*.

Estas desviaciones se tienen que establecer según alguna experiencia en el tema. En este caso, se van a tomar las desviaciones muestrales calculadas del resultado de las 50 muestras tomadas con el espectrofotómetro de la reflexión del sustrato con *primer* y sin *primer*.

$$\sigma_{sp} = s_{sp} = 0.547617969$$

$$\sigma_{cp} = s_{cp} = 0.475730344$$

Se calcula  $n$ :

$$n = \frac{6.6564(0.547617969^2 + 0.475730344^2)}{0.557361353^2} = 11.27510289$$

$$n = 12$$

### 8.3.3 Estate Label

Con el resultado de las 50 mediciones preliminares del sustrato con *primer* y 50 del sustrato sin *primer*, se establecen los intervalos de confianza en 31.08% para la distribución normal del sustrato con *primer* y sin *primer*. El valor de  $z_{\alpha/2}$  que incluye aproximadamente 31.08% de las muestras es 0.4. Por lo tanto, el intervalo de confianza es  $\bar{y} \pm 0.4s_{\bar{y}}$ . Los resultados se ven en la tabla 8.4.

	$\mu$	$s_{\bar{y}}$	LCI	LCS
<b>Sin primer</b>	93.2648	0.194969126	93.18681235	93.34278765
<b>Con primer</b>	93.3872	0.093446027	93.34982159	93.42457841

Tabla 8.4. Resultados de las 50 muestras preliminares del sustrato con *primer* y sin *primer*

Las gráficas de la distribución normal de la media de la luminancia de la reflexión de luz difusa y los límites de confianza del sustrato con y sin *primer*, se ven en la figura 8.6

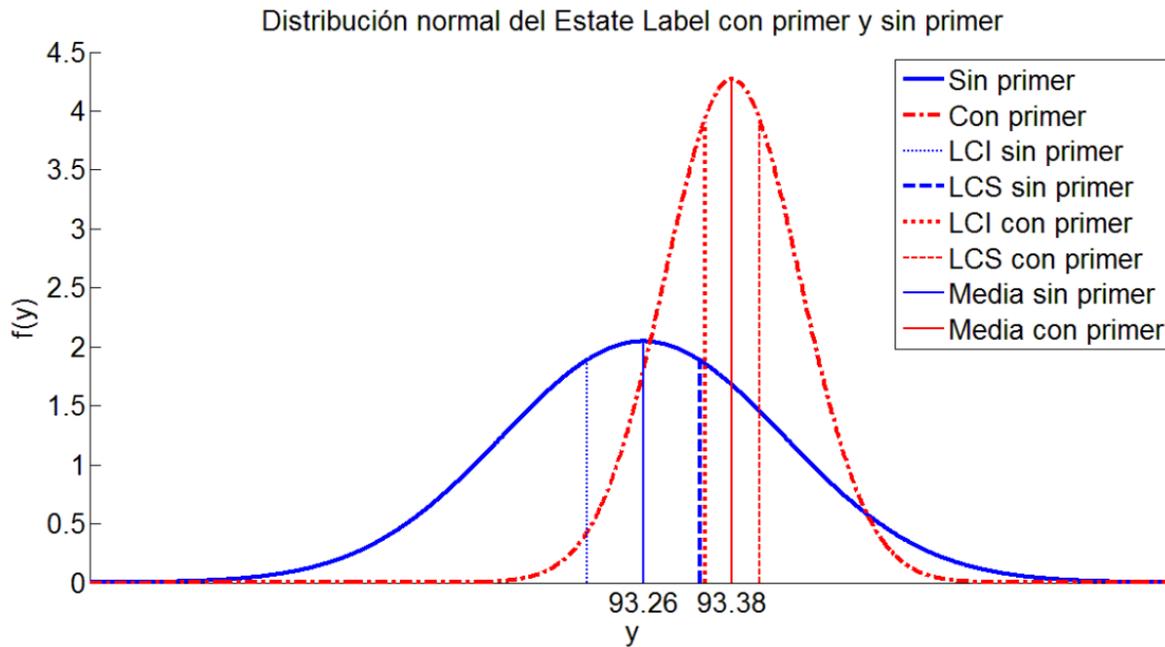


Figura 8.8. Distribución de probabilidad del sustrato con y sin *primer*

El valor de la diferencia de las medias es:

$$93.3872 - 93.2648 = .1224$$

Este valor se establece de la diferencia entre el límite de confianza inferior del sustrato sin primer y el límite de confianza superior del sustrato sin primer. Este valor se iguala a  $2\sigma$  con una probabilidad de .95.

$$2\sigma = 0.007033939$$

La gráfica de la distribución normal de la desviación de la diferencia de medias y sus límites de confianza, se ve en la figura 8.9.

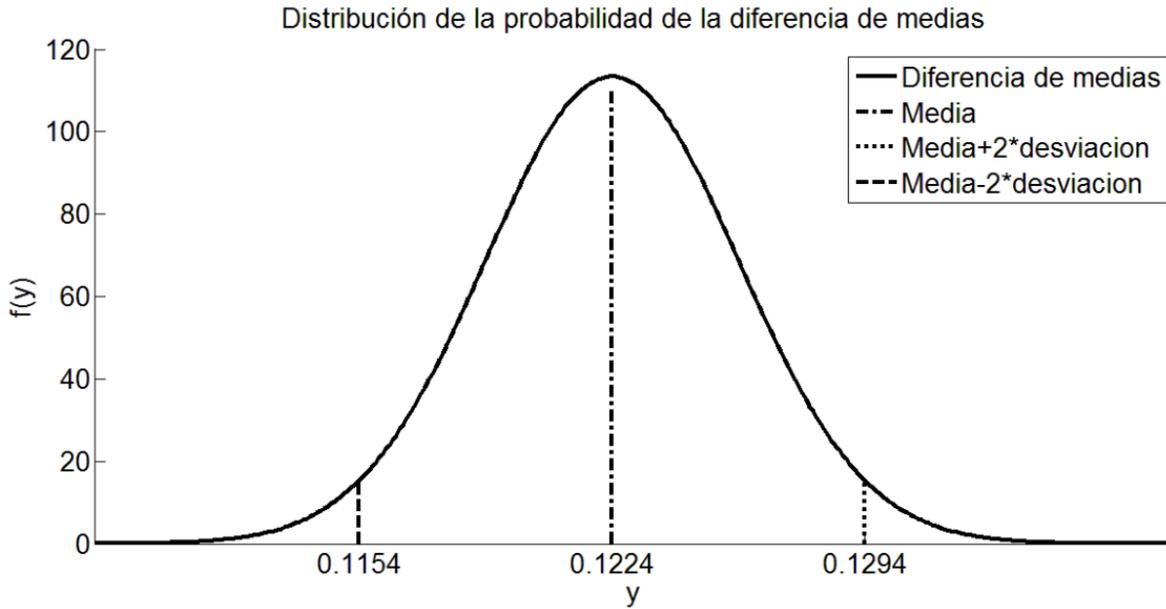


Figura 8.9. Desviación de la probabilidad de la diferencia de medias

Esto significa que si el valor de la diferencia es menor a .1154, los valores de  $LCI_{Con primer}$  y  $LCS_{Sin primer}$  con una probabilidad de 31.08% se encimarían, haciendo imposible de distinguir a dónde pertenecería (con su probabilidad) una medición de caer en la intersección de los límites de confianza.

Para calcular el tamaño de la muestra se debe tener un estimado de las desviaciones de ambas medias así como la desviación de la diferencia de las medias que se acaba de estimar.

La magnitud de la desviación de la diferencia de las medias se justifica en el inciso anterior:

$$2\sigma_{(\bar{y}_{Sin primer} - \bar{y}_{Con primer})} = 0.007033939$$

Se tiene:

$$\sigma_{\bar{y}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Entonces:

$$\sigma_{(\bar{y}_{sp} - \bar{y}_{cp})} = \sqrt{\frac{\sigma_{sp}^2}{n_{sp}} + \frac{\sigma_{cp}^2}{n_{cp}}}$$

Se iguala el valor máximo aceptable estimado a la desviación muestral:

$$2\sigma_{(\bar{y}_{sp}-\bar{y}_{cp})} = 2\sqrt{\frac{\sigma_{sp}^2}{n_{sp}} + \frac{\sigma_{cp}^2}{n_{cp}}} = 0.007033939$$

Se establece que  $n_{sp} = n_{cp} = n$ .

$$2\sqrt{\frac{\sigma_{sp}^2}{n} + \frac{\sigma_{cp}^2}{n}} = 0.007033939$$

Se despeja  $n$ :

$$\frac{\sigma_{sp}^2 + \sigma_{cp}^2}{n} = \left(\frac{0.007033939}{2}\right)^2$$

$$n = \frac{4(\sigma_{sp}^2 + \sigma_{cp}^2)}{0.007033939^2}$$

Para estimar  $n$  (número de muestras) tenemos que dar un valor estimado de las desviaciones poblacionales del sustrato con *primer* y sin *primer*.

Estas desviaciones se tienen que establecer según alguna experiencia en el tema. En este caso, se van a tomar las desviaciones muestrales calculadas del resultado de las 50 muestras tomadas con el espectrofotómetro de la reflexión del sustrato con *primer* y sin *primer*.

$$\sigma_{sp} = s_{sp} = 0.194969126$$

$$\sigma_{cp} = s_{cp} = 0.093446027$$

Se calcula  $n$ :

$$n = \frac{4(0.194969126^2 + 0.093446027^2)}{0.007033939^2} = 3779.193229$$

$$\mathbf{n = 3780}$$

### 8.3.4 Conclusiones

- BOPP Blanco

El intervalo de confianza del sustrato con y sin *primer* es aproximadamente 80%. Para asegurar que la desviación de la diferencia de las medias este dentro del rango deseado se deben tomar 282 muestras del sustrato con *primer* y 282 muestras del sustrato sin *primer*.

Un intervalo de confianza del 80% es una buena primera aproximación y vale la pena realizar los experimentos de las 282 muestras para analizar los resultados.

- BOPP Metalizado

El intervalo de confianza del sustrato con y sin *primer* es aproximadamente 99%. Para asegurar que la desviación de la diferencia de medias este dentro de los límites deseados se deben tomar 12 muestras del sustrato con y sin *primer*.

Para adquirir experiencia en el comportamiento de la reflexión de la luz en el sustrato, se tomaron 50 muestras del material con y sin *primer*.

No vale la pena realizar el experimento para tomar 12 muestras cuando se tiene el resultado de 50 muestras.

- Estate Label

Se estableció un intervalo de confianza de aproximadamente 31% para que los intervalos de la media con *primer* y sin *primer* no intersectaran.

Para asegurar la confiabilidad de la diferencia de la desviación de las medias se tienen que tomar 3780 muestras.

El intervalo de confianza del 31% es inaceptable como umbral de confianza. Se puede concluir que este método no sirve para diferenciar las medias de la luminancia del sustrato con *primer* y sin *primer*.

#### 8.4 Experimentos de BOPP Blanco con base de estireno, de noche, $n=300$

Con el resultado de  $n = 282$  se tomaron 300 muestras del sustrato con *primer* y 300 muestras del sustrato sin *primer*. El experimento con 300 muestras del sustrato con y sin *primer* se realizó dos veces.

Se establecieron las condiciones de algunos factores antes de realizar los experimentos de las 300 muestras con el BOPP. Estos factores son:

- Luz ambientales

Las mediciones se tomaron en la noche y con todas las luces de los alrededores apagadas. La medida de luz en el cuarto no está cuantificada.

- Base

La base es una superficie de estireno blanco. La base tiene que estar en buenas condiciones y limpia.

- Probetas

Se toman 10 hojas, de un metro cada una. Una entre cada intervalo de 10 metros. Se tomaron 30 mediciones por metro. Las probetas se ven en la figura 8.10.

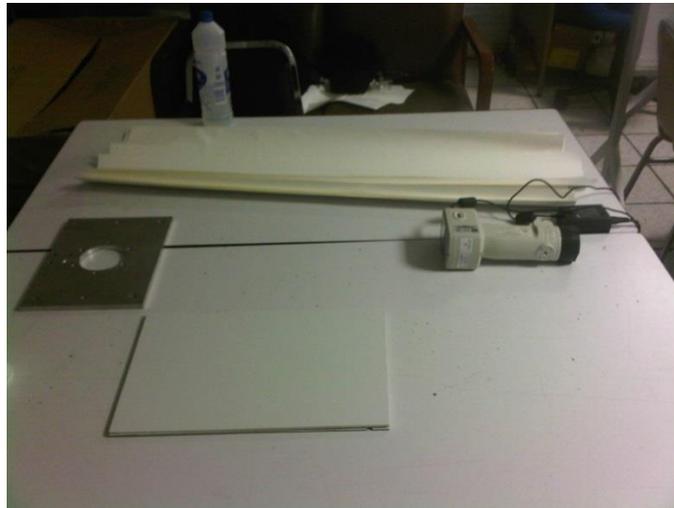


Figura 8.10. Probetas, espectrofotómetro y base de estireno

- Instrumentación

Antes de tomar las mediciones con el espectrofotómetro se calibró en las condiciones ambientales.

En la figura 8.11 se muestra un ejemplo de cómo se tomaron las mediciones de luminancia con el espectrofotómetro.



Figura 8.11. Obtención de las mediciones de luminancia.

#### 8.4.1 Resultado del experimento – Primera iteración

El intervalo de confianza resultó de 73.3%. El valor de  $z_{\alpha/2}$  que incluye aproximadamente el 73.3% de las muestras es 1.1. Por lo tanto, el intervalo de confianza es  $\mu \pm 1.1 \sigma$ . Los resultados se ven en la tabla 8.5.

	$\mu$	$\sigma$	LCI	LCS
<b>Con primer</b>	93.72046667	0.04345629	93.67223019	93.76870315
<b>Sin primer</b>	93.80476667	0.02696193	93.77483893	93.83469441

Tabla 8.5. Resultado de las 300 muestras de BOPP blanco con *primer* y 300 muestras de BOPP blanco sin *primer*

La diferencia de medias es:

$$\mu_{sp} - \mu_{cp} = .0843$$

La desviación de la diferencia de las medias es:

$$\sigma_{(\bar{y}_{sp} - \bar{y}_{cp})} = \sqrt{\frac{\sigma_{sp}^2}{n} + \frac{\sigma_{cp}^2}{n}} = 0.00295262$$

El valor de  $2\sigma$  debe ser menor al del intervalo  $LCI_{sp} - LCS_{cp} = 0.006135781$  para asegurar una probabilidad de .95 en la desviación de la diferencia de las medias.

$$2\sigma = 0.005905246 < 0.006135781$$

- NOTAS DEL EXPERIMENTO

- Se calibró el espectrofotómetro durante el experimento y las mediciones cambiaron totalmente. El experimento se tuvo que reiniciar.
- Se manipularon mucho las hojas del sustrato sin *primer*. Su desviación fue muy grande

Las gráficas de la distribución normal de las media de la luminancia de la reflexión de luz difusa y los límites de confianza del sustrato con y sin *primer*, se ven en la figura 8.12.

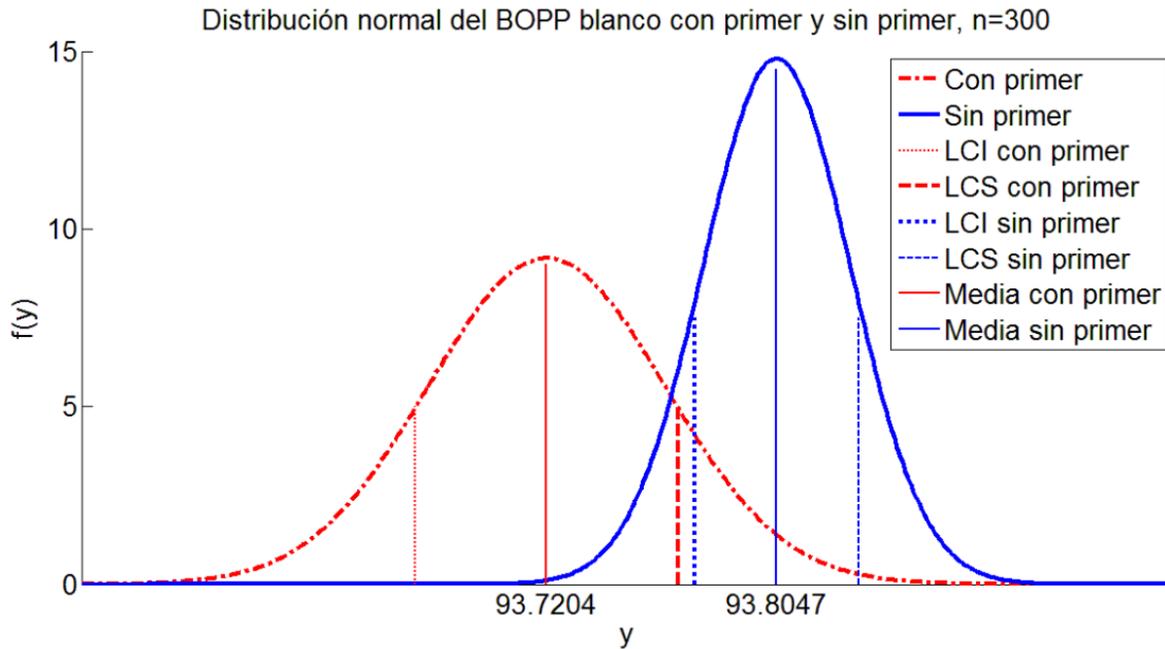


Figura 8.12. Distribuciones normales del experimento, n=300

### 8.4.2 Resultado del experimento – Segunda iteración

El intervalo de confianza resultó de 73.72%. El valor de  $z_{\alpha/2}$  que incluye aproximadamente el 73.3% de las muestras es 1.12. Por lo tanto, el intervalo de confianza es  $\mu \pm 1.12 \sigma$ . Los resultados se ven en la tabla 8.6.

	$\mu$	$\sigma$	LCI	LCS
<b>Con primer</b>	93.8016333	0.035510546	93.76186152	93.8414051
<b>Sin primer</b>	93.8756667	0.025740155	93.84683769	93.9044956

Tabla 8.6. Resultado de las 300 muestras de BOPP blanco con *primer* y 300 muestras de BOPP blanco sin *primer*

La diferencia de medias es:

$$\mu_{sp} - \mu_{cp} = 0.074033333$$

La desviación de la diferencia de las medias es:

$$\sigma_{(\bar{y}_{sp} - \bar{y}_{cp})} = \sqrt{\frac{\sigma_{sp}^2}{n} + \frac{\sigma_{cp}^2}{n}} = 0.002532163$$

El valor de  $2\sigma$  debe ser menor al del intervalo  $LCI_{sp} - LCS_{cp} = 0.00543255$  para asegurar una probabilidad de .95 en la desviación de la diferencia de las medias.

$$2\sigma = 0.00506433 < 0.00543255$$

Las gráficas de la distribución normal de las media de la luminancia de la reflexión de luz difusa y los límites de confianza del sustrato con y sin *primer*, se ven en la figura 8.13.

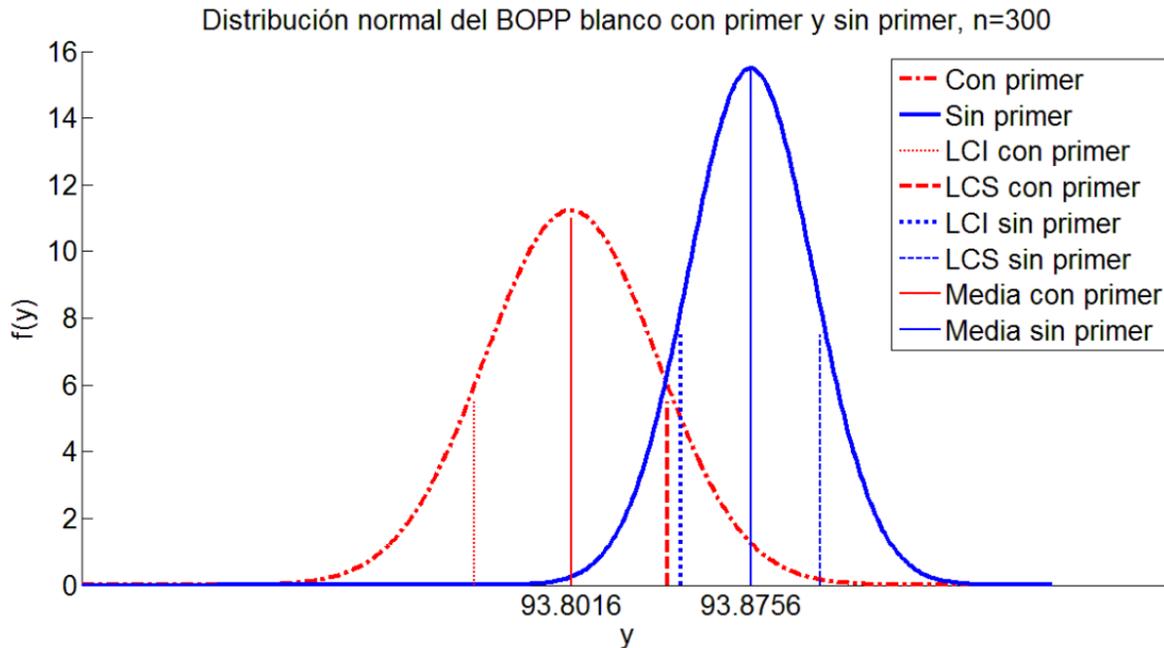


Figura 8.13. Distribuciones normales del segundo experimento

### 8.4.3 Conclusiones

En el primer experimento la desviación de la medición de la luminancia del sustrato con *primer* (0.04345629) resultó relativamente grande en comparación con la del sustrato sin *primer* (0.02696193). Posiblemente por la manipulación excesiva de las hojas por el incidente de la calibración del espectrofotómetro previamente mencionada.

En el segundo experimento la desviación de la medición de la luminancia del sustrato con *primer* disminuyó de 0.04345629 a 0.035510546 y la desviación de la medición del sustrato sin *primer* disminuyó de 0.02696193 a 0.025740155 en el segundo experimento.

El valor de la diferencia de medias bajó del primer experimento (0.0843) al segundo experimento (0.074033333).

El intervalo de confianza del primer experimento es 73.3% y del segundo es 73.72%. Se puede concluir que el intervalo de confianza del valor de la luminancia del BOPP blanco usando una base de estireno blanco, tomando las mediciones de noche, es aproximadamente 73%.

Para intentar mejorar la consistencia del sensado, especialmente en la desviación de la medición de la luminancia del sustrato con *primer*, se propone modificar los siguientes factores, que se ven en la figura 8.14:

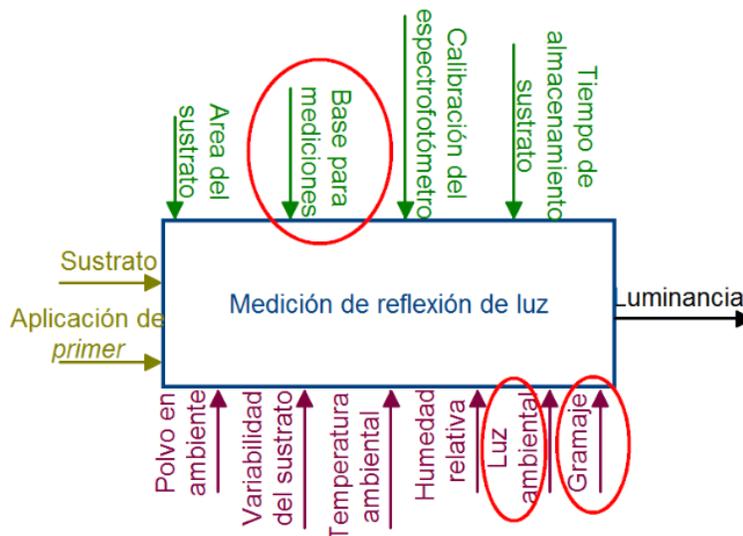


Figura 8.14. Factores que se modificarán para el siguiente experimento

- Base para las mediciones.

Antes de decidir usar estireno blanco como base para las mediciones se probaron con cartones gruesos de 3 diferentes colores (blanco, negro y blanco huevo). Incluso se probó como base poner un pedazo de sustrato de BOPP metalizado.

Al usar el estireno blanco en buenas condiciones y limpio, las mediciones entre los sustratos con y sin *primer* y sus desviaciones, mejoraron.

Se propone buscar alguna base blanca estandarizada para hacer pruebas de color. Por ejemplo, la superficie blanca con la cual se calibran los espectrofotómetros y densitómetros.

- Luz ambiental

Se tomaron mediciones con luz del sol y con el espectrofotómetro encerrado en un banco de pruebas y se compararon. Las mediciones fueron muy diferentes. La luz del sol y la luz ambiental influyen mucho en la reflexión de la luz del sustrato.

Se propone usar un cuarto oscuro para experimentar, cuantificando la cantidad de luz con un luxómetro.

- Gramaje

Una posible respuesta a la influencia tan grande del factor de la base en los experimentos es que el material BOPP blanco usado deja pasar la luz. Teniendo esto en cuenta, se debería considerar para sustratos delgados un tercer fenómeno de la luz, la refracción.

Se propone experimentar con diferentes gramajes, *liner* y pegamento de BOPP blanco para poder concluir en la influencia del gramaje en los fenómenos de la luz.

Con respecto al BOPP blanco, se concluye que existe una diferencia medible consistente entre las medias del sustrato con *primer* y sin *primer* pero los intervalos de confianza no son lo suficientemente grandes como para implementar la solución en la industria.

### **8.5 Experimentos de BOPP blanco con base de vinil blanco en cuarto oscuro**

Se establecieron las condiciones de algunos factores antes de realizar los experimentos. Estos factores son:

- Luz ambiental

Se tomaron las pruebas en un cuarto oscuro para revelar fotografías en el Fotoclub de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Se intentó cuantificar la luminancia en el cuarto oscuro. El valor más pequeño sentido por el luxómetro usado es una décima de lux. La medición de luxómetro fue 00.0 lux, de haber luz en el cuarto oscuro, estará en el orden de las centésimas de lux.

- Base

Se hicieron pruebas con 3 diferentes bases: Estireno, vinil blanco y vinil negro.

### 8.5.1 Base

En la realización de las pruebas con diferente base, se usó el sustrato BOPP blanco sin *primer*, cuyas especificaciones se pueden ver en la Tabla 8.1 “Sustratos”.

Los resultados de la media muestral de la luminancia del BOPP blanco con las diferentes bases se ven en la tabla 8.7.

	$s$	$\bar{y}(L)$	$n$
<b>Vinil blanco</b>	0.01203993	94.9048	50
<b>Estireno</b>	0.02074994	93.8012	50
<b>Vinil negro</b>	0.04848458	91.4970175	57

Tabla 8.7. Resultados del espectrofotómetro usando diferentes bases.

Una visualización con una gráfica de barras de la desviación de las mediciones se ve en la figura 8.15.

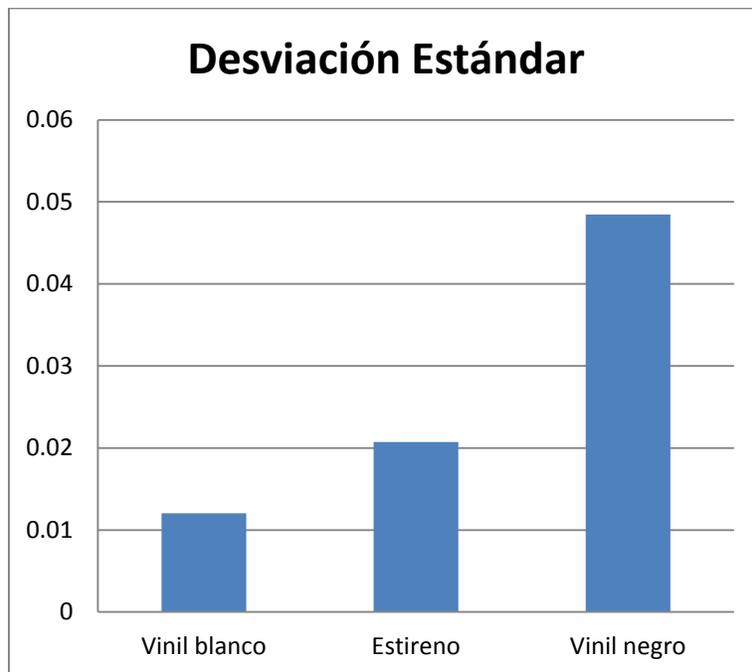


Figura 8.15. Desviación estándar de la reflexión del BOPP blanco de las diferentes bases.

La desviación más pequeña fue la del vinil blanco. Una desviación pequeña no garantiza un mejor resultado en el experimento porque no se sabe cómo se comportará la diferencia de las medias.

Es posible que el valor de la luminancia del sustrato este correlacionado con el tamaño de su desviación estándar.

### 8.5.2 Resultados del experimento

Los sustratos que se usaron en este experimento son el BOPP blanco sin *primer* y BOPP blanco con *primer*, Tabla 8.1 “Sustratos”

Se tomaron 50 muestras del BOPP blanco con *primer* y 50 muestras del BOPP blanco sin *primer* para adquirir experiencia del comportamiento de la luminancia.

Se hizo el primer experimento con las muestras que estaban cortadas en hoja y las desviaciones fueron muy grandes.

Estas desviaciones disminuyeron al tomar las muestras directamente de las bobinas con sustrato que no había sido manipulado.

Los intervalos de confianza resultaron en 96.42 % y su intervalo de confianza es  $\bar{y} \pm 2.1 s_{\bar{y}}$ . Los resultados se ven en la tabla 8.8

	$\bar{y}$	$s$	LCI	LCS
Sin <i>primer</i>	94.9328	0.017554487	<b>94.8959356</b>	94.96966442
Con <i>primer</i>	94.8428	0.021544373	94.7975568	<b>94.88804318</b>

Tabla 8.8. Resultado del experimento

Las gráficas de la distribución normal de las media de la luminancia de la reflexión de luz difusa y los límites de confianza del sustrato con y sin *primer*, se ven en la figura 8.16.

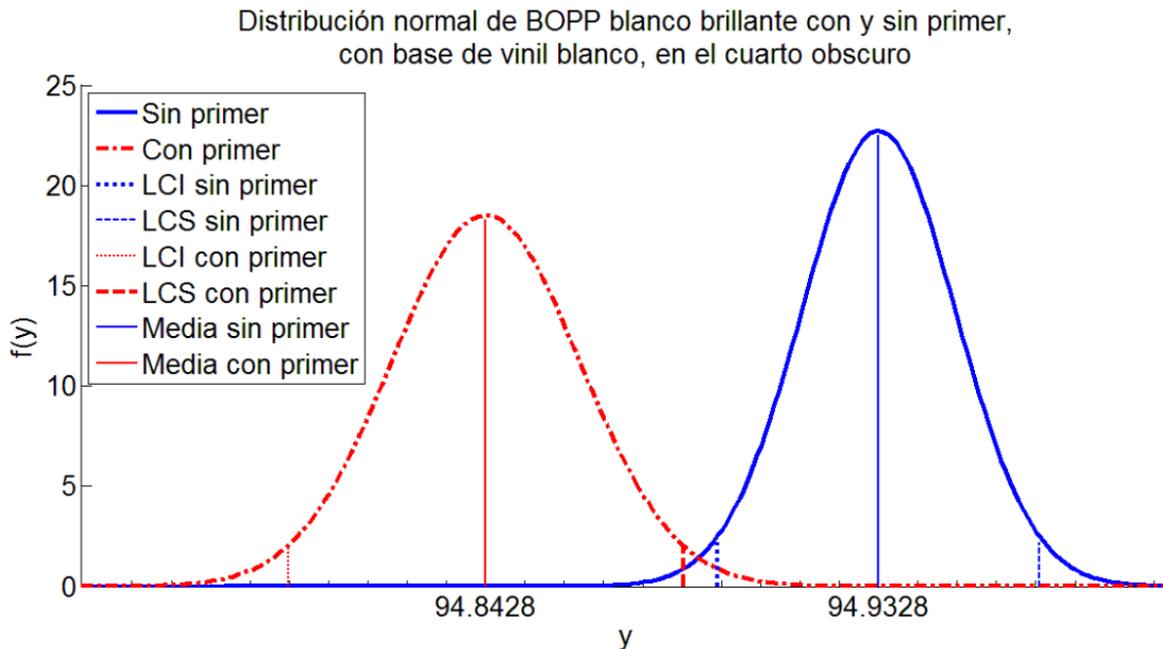


Figura 8.16. Distribución normal del sustrato con base de vinil blanco, en cuarto oscuro

El valor de la diferencia de las medias es:

$$94.9328 - 94.8428 = 0.09$$

El valor de 0.09 es el mayor al obtenido de todos los experimentos realizados hasta el momento.

Este valor se establece de la diferencia entre el límite de confianza inferior del sustrato sin *primer* y el límite de confianza superior del sustrato con *primer*. Este valor se iguala a  $2.58\sigma$  con una probabilidad de .99.

$$2.58\sigma_{(\bar{y}_{Sin\ primer} - \bar{y}_{Con\ primer})} = 94.8959356 - 94.88804318 = 0.0078924$$

Esto significa que si el valor de la diferencia es menor a  $0.09 - 0.0078924 = 0.082107605$ , los valores de  $LCI_{Sin\ primer}$  y  $LCS_{Con\ primer}$  con una probabilidad de 96.42% se encimarían, haciendo imposible de distinguir a dónde pertenecería (con una probabilidad del 99%) una medición de caer en la intersección de los límites de confianza.

Para el cálculo de  $n$ , se establece que:

$$n_{sp} = n_{cp} = n.$$

$$\sigma_{sp} = s_{sp} = 0.017554487$$

$$\sigma_{cp} = s_{cp} = 0.021544373$$

Se calcula:

$$n = \frac{2.58^2(\sigma_{sp}^2 + \sigma_{cp}^2)}{0.0078924^2} = 33.99909758 \approx \mathbf{34}$$

### 8.5.3 Conclusiones

El resultado de los intervalos de confianza en 96.42% aumentó 23.12% y 22.7% respectivamente a los intervalos obtenidos en el experimento anterior de 73.3% y 73.72%.

El intervalo de 96.42% tiene una probabilidad del 99%, un incremento del 4% en comparación con los experimentos anteriores con el BOPP blanco que tenían una probabilidad del 95%.

El resultado de la diferencia de medias de 0.09 aumentó 0.0057 comparado con el resultado más grande obtenido en el experimento pasado que fue 0.0843.

El valor de  $n = 34$  dice que los valores con  $n = 50$  son confiables. Aun así, es recomendable llevar a cabo el experimento un par de veces más, para recopilar más información con la cual se tendrá una conclusión más confiable.

## 9. Conclusiones

- Gracias al resultado de la investigación de mercado, el primer estudio de mercado, la investigación de tecnologías existentes y la segunda recopilación de información con una imprenta, se delimitaron los alcances del proyecto y los objetivos de la tesis, expuestos en el capítulo 3 de esta tesis.
- En el capítulo de *Pruebas preliminares* se empezó a plantear la metodología experimental al encontrar el parámetro de medición para diferenciar el sustrato con *primer* del sustrato sin *primer*, la **reflexión de luz difusa**.
- En el capítulo de *Diseño de experimentos* se plantearon tres experimentos para la resolución del alcance del proyecto. El planteamiento del experimento 1 es pertinente para los objetivos de la tesis y los experimentos 2 y 3, para el desarrollo del producto final. En el experimento 1, para verificar la aplicación del *primer* en el sustrato, se cumple con una parte del diseño de experimentos y el planteamiento de los factores que afectan en el proceso de aplicación de *primer* y de sensado de *primer* en el sustrato, sus niveles y rangos.
- En el capítulo 8 *Realización de experimentos* se modifica el experimento planteado en el capítulo 7 *Diseño de experimentos*, con ayuda de las muestras facilitadas por la empresa Avery Dennison S.A. de C.V., y se plantea la metodología final para encontrar la diferencia de la medición de la luminancia de la luz difusa del sustrato con *primer* y el sustrato sin *primer* y cumplir con el objetivo principal de la tesis.

Se hicieron varios experimentos variando los factores controlables del proceso de la medición de la luminancia de la luz difusa en el sustrato, y se encontró que los factores de la base para tomar las mediciones y la luz ambiental, son de gran influencia en el resultado final de la medición, cumpliendo con el primer objetivo particular de la tesis.

En el capítulo 8, como parte de la metodología experimental final, se hace una inferencia estadística y se calculan intervalos de confianza para la media de la medición de la luminancia de la luz difusa del sustrato con *primer* y sin *primer*, y para la desviación de la diferencia de las medias. Esto cumple con el segundo objetivo particular de esta tesis.

En la última ronda de experimentación, usando base de vinil blanco en un cuarto oscuro, los valores de la medición de la reflexión de la luz difusa en el sustrato mejoraron significativamente, como se ve en la sección 8.5.3.

## Referencias

- [1] Tilley, R. J. D. (2011). *Colour and the Optical Properties of Materials*. UK: WILEY
- [2] Hunter Lab, 2014. *Measuring Color using Hunter L, a, b versus CIE 1976 L\*a\*b\**. [Online]. Disponible en: [www.hunterlab.com/an-1005b.pdf](http://www.hunterlab.com/an-1005b.pdf)
- [3] Mendenhall, W., Beaver, R. J., Beaver, B. (2010). *Introducción a la Probabilidad y Estadística*. (13ª. ed.) México: Cengage Learning Editores
- [4] Jaramillo, G. A. (1997). Apéndice. En *Electricidad y Magnetismo* (pp. 473-475). México: Trillas.
- [5] Ostawalder, A., Pigneur, Y. (2009). *Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers*. US: Publicación Independiente.
- [6] INEGI, 2013. Consulta virtual del Censo Económico 1999. [Online]. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/censos/ce1999/saic/default.asp?modelo=CMAP>
- INEGI, 2013. Consulta virtual del Censo Económico 2004. [Online]. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/saic/?evento=2004>
- INEGI, 2013. Consulta virtual del Censo Económico 2009. [Online]. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/saic/>
- [7] Cámara Nacional de la Industria de las Artes Gráficas. 2012. *LA INDUSTRIA DIGITAL ACTUALIDAD Y PERSPECTIVAS* [Online]. Disponible en: <http://www.canagraf.mx/>
- [8] Ulrich, K. T., Eppinger, S. D. (2008). *Product Design and Development*. (4ª. ed.). US: McGraw-Hill.
- [9] DRUPA, 2013. *DRUPA 2012 Database*. [Online]. Disponible en: [http://www.drupa.com/cipp/md\\_drupa/custom/pub/show,oid,17566/lang,2/ticket,guets/~Database\\_2012.html](http://www.drupa.com/cipp/md_drupa/custom/pub/show,oid,17566/lang,2/ticket,guets/~Database_2012.html)
- [10] Hunkeler, 2013. *Priming/Coating on Demand*. [Online]. Disponible en: [http://www.hunkeler.ch/hunkeler\\_mm/Flyers/PrimerCoater\\_e2.pdf](http://www.hunkeler.ch/hunkeler_mm/Flyers/PrimerCoater_e2.pdf)

- [11] Epic Products International, 2013. *Digital Coaters*. [Online]. Disponible en: <http://epicproducts.com/products/coaters/digital-coaters/>
- [12] Expográfica, 2013. *Expográfica 2013*. [Online]. Disponible en: [http://www.expografica.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=3&Itemid=213&lang=es](http://www.expografica.com/index.php?option=com_content&view=article&id=3&Itemid=213&lang=es)
- [13] Michelman, 2013. *Sapphire*. [Online]. Disponible en: <http://www.michelman.com/Products/Sapphire/>
- [14] Michelman, 2013. Primers for HP Indigo Press Owners. [Online]. Disponible en: <http://www.lexjet.com/DataSheets/Michelman%20Primers.pdf>
- [15] Konica Minolta, 2014. *Spectrophotometer CM-700d/600d, Manual de Instrucciones* [Online]. Disponible en: [http://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction\\_manual/color/pdf/cm-700d\\_instruction\\_spa.pdf](http://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction_manual/color/pdf/cm-700d_instruction_spa.pdf)
- [16] International Organization for Standardization, 2014. *Graphic technology and photography -- Viewing conditions*. [Online]. Disponible en: [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail?csnumber=43234](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=43234)
- [17] International Organization for Standardization, 2014. *Graphic technology -- Colour and transparency of printing ink sets for four-colour printing -- Part 1: Sheet-fed and heat-set web offset lithographic printing*. [Online]. Disponible en: [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=39377](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=39377)
- [18] Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos*. (2<sup>a</sup>. ed.) México: LIMUSA WILEY

Table A1.1 Units used in radiometry and photometry

Radiometry			Photometry		
Name, symbol	Comments	Units	Name, symbol	Comments	Units
Radiant power, radiant flux, $\Phi$ , $P$	Rate of flow of energy emitted by a source	W	Luminous power, luminous flux, $F$ , $\Phi_v$	Rate of flow of luminous energy emitted by a source	lumen (lm) (cd sr)
Radiant intensity $I = d\Phi/d\Omega$	The power of an emitting source per unit solid angle	$W sr^{-1}$	Luminous intensity, $I_v$	Light emitted from a source per unit solid angle; SI base unit	candela (cd) = $lm sr^{-1}$
Radiance, $L = d^2\Phi/(dA d\Omega)$	Radiant power per unit area per unit solid angle. Radiant intensity of a radiating source per unit surface area.	$W m^{-2} sr^{-1}$	Luminance, $L_v$	A measure of 'brightness'; luminous intensity of a light-emitting source per unit area of source; may vary over the source surface	$cd m^{-2}$ (nit!)
Irradiance $E (I) = d\Phi/dA$	Radiant power incident upon a unit area of a surface.	$W m^{-2}$	Illuminance, $E_v$	A measure of illumination; the luminous flux falling on a surface per unit area	lux ( $lm m^{-2}$ )
(Radiant) Exitance $M = d\Phi/dA$	Radiant power emitted by a surface per unit area	$W m^{-2}$	Luminous exitance, $M_v$	Luminous flux emitted from a surface	lux ( $lm m^{-2}$ )

Flux is the amount of something flowing through a specified surface per unit time.

Luminous flux or luminous power  $F$ , unit lumen (lm): 1 lm is the amount of luminous flux passing in 1 s through a unit solid angle emitted by a point source of 1 cd. The total luminous flux of such a point source is  $4\pi$  lumens.

Luminous intensity  $I_v$ , unit candela (cd): 1 cd is the photometric measurement of luminous intensity in a given direction of a source that emits monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz and that has a radiant intensity in that direction of (1/683) watts per steradian. One square metre of a black body at 2042 K emits 600 000 cd.

Radiance  $L$ , units  $W m^{-2} sr^{-1}$ : the radiance is the incoming radiation collected from a small angle of surroundings (measured in steradians) as if, for example, the detector is at the bottom of a tube. The units of radiance are energy per unit area per unit solid angle,  $W m^{-2} sr^{-1}$ . The radiance is direction sensitive – the value recorded depends upon the direction in which the tube is pointing.

Irradiance  $E$  or  $I$ , unit  $W m^{-2}$ : the radiometric term irradiance is the total energy that a detector 'sees' from a hemisphere of surroundings. The preferred symbol for irradiance is  $E$ , but because of the use of  $E$  for energy, and of  $\mathcal{E}$  for the amplitude of an electromagnetic wave, it is less confusing here to use the symbol  $I$ .

Illuminance  $E_v$ , unit lux (lx): this is the photometric analogue of irradiance, being the total luminous flux incident upon unit area of a surface, with units of lux =  $lm m^{-2}$ . The photometric term illuminance has replaced the term brightness.

Radiant exitance or radiant emittance  $M$ , unit  $W m^{-2}$ : the amount of electromagnetic radiation leaving a surface is described by the radiometric term (radiant) exitance. The exitance is the opposite of the irradiance, as it measures the total energy emitted by a surface into a hemisphere of the surroundings. The exitance has the same units as irradiance.

Luminous exitance or luminous emittance  $M_v$ , unit lux (lx): this is the photometric analogue of the radiometric radiant exitance.

Spectral units. These give the distribution of the quantity under discussion with respect to the wavelength or frequency of the radiation. For example, the spectral irradiance takes the form irradiance per unit wavelength, written  $E_\lambda$ , or irradiance per unit frequency  $E_\nu$ . The units of spectral quantities must contain the units of wavelength or frequency as appropriate. Thus, the units of spectral irradiance are  $W m^{-2} m^{-1} = W m^{-3}$ .

Anexo 2. Estado del arte e identificación de las funciones básicas de un alimentador automático de hojas.

### Estado del arte

Los alimentadores automáticos de sustrato en hojas de diferentes máquinas, tienen componentes y tecnologías diferentes para manipular el sustrato. Por ejemplo, en la serie 2 de las HP Indigo, usan un elevador, un ventilador para despegar las hojas, y un sistema de bandas de hule para transportar y alinear el sustrato antes de alimentar a la máquina de impresión; las Heidelberg Speedmaster usan un elevador, dos mecanismos de ventosas y una escuadra para alinear las hojas antes de entrar a las estaciones de impresión. Independientemente de la tecnología que usen, se puede cuantificar la velocidad de alimentación, en este caso: los alimentadores de las máquinas HP Indigo de la serie 2, tiene una velocidad máxima de 16,000 hojas por hora; la Heidelberg Speedmaster tiene una velocidad máxima de entre 13, 000 – 15, 000 hojas por hora.

### Análisis funcional del alimentador automático de hojas

- Altura de la pila de hojas
  - Motor elevador
  - Gravedad
  - Baraja
- Despegar las hojas
  - Ventilador
  - Pestaña
  - Rodillos
- Manipulación de hojas
  - Ventosas (horizontales y verticales)
  - Rodillos
  - Bandas
- Transporte de hojas
  - Mecanismo plano
  - Mecanismo 3d (levas, correderas y/o mecanismo esférico)
  - Rodillos
  - Bandas
  - Resbaladilla
- Alineación
  - Escuadra (mecanismo)
  - Bandas vacío

### Anexo 3. Estudio de mercado

Empresa:					
Cargo:					
¿En qué presentación de sustrato imprimes?					
	Hoja	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Bobina	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Ambas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
¿Qué tipos de procesos de tratado de sustrato, previos o posteriores a la impresión, realizan en la empresa donde trabajas?					
¿En qué proceso o máquina buscas una mejora? (proceso y presentación de sustrato)					
De las máquinas que manejas:					
¿Cuáles son los beneficios?					
¿Cuáles son las desventajas?					
¿Qué características son las que buscas en una máquina que mejore tu proceso?					
Si se te ofreciera una máquina nueva que realice el proceso que buscas mejorar de manera automática (alimentador+ proceso+ apilador)					
¿Cuál sería tu percepción? (5 siendo excelente y el 1 pésimo)					
	<input type="checkbox"/>				
¿Cuál sería el precio que pagarías por una máquina automática que te proporcione mejora en el proceso?					
	Menos de \$15,000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	15,000 a 20,000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	20,000 a 25,000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	20,000 a 30,000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Más de 30,000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
*Precio en dólares					
¿Te interesarían servicios adicionales?					
	Sí	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	No	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
¿Cuáles?					
Gracias					

## Anexo 4. Estudio de mercado

### MERMA

- ¿Cuánto papel desperdician en el proceso de aplicación de *primer*?
- ¿Cuántas horas máquina desperdician en el proceso de aplicación de *primer*?
- ¿Cuánto papel desperdician imprimiendo, a causa del papel con tratamiento incorrecto de *primer*?
- ¿Cuánto tiempo de impresión desperdician a causa del papel con tratamiento incorrecto de *primer*?
- ¿Te fallan las bobinas viejas (almacenadas)?

### PAPEL COMPRADO PRETRATADO

- ¿Qué porcentaje del papel compran con tratamiento previo de *primer*?
- ¿Qué *primer* compras?
- ¿Cuándo te das cuenta que fallo el *primer*?
- ¿Cómo te das cuenta como fallo el *primer*?
- ¿Qué tipos de procedimientos conoces para indicar que el *primer* no está bien aplicado?
- ¿Qué marcas y tipos de *primer* usan?

### MÁQUINAS

De las máquinas que usan para la aplicación de *primer*:

- ¿Cuáles son sus ventajas?
- ¿Cuáles son las desventajas?

### PROYECTO

El alcance final es una maquina con alimentador, proceso, sistema de calidad y apilador/rebobinador.

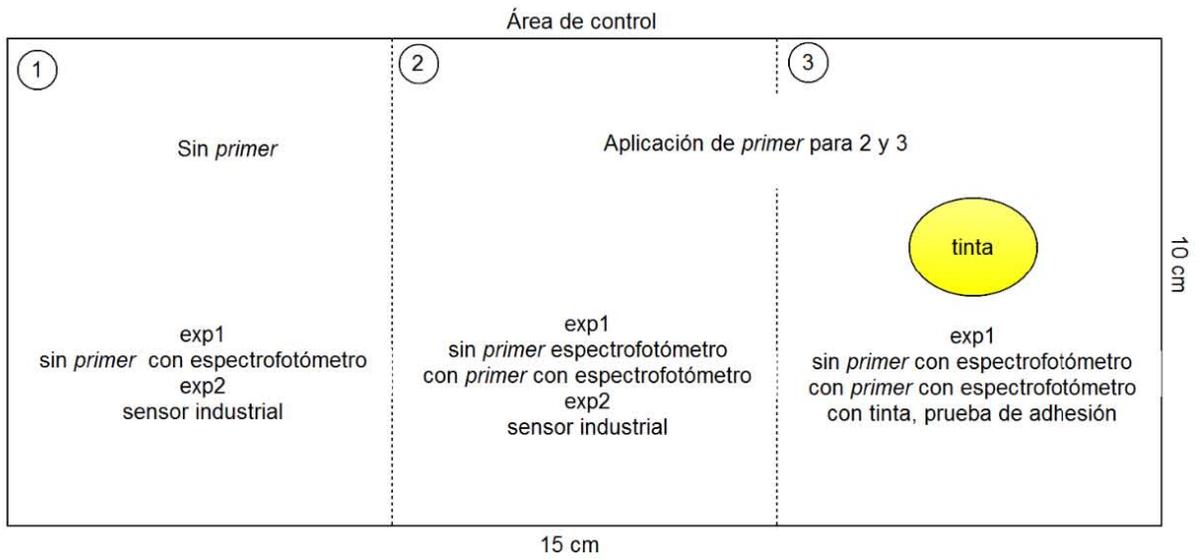
La innovación tecnológica es un sistema de calidad de aplicación de *primer* que constaría de:

Este sistema tiene como entrada el papel tratado, un proceso de sensado no invasivo a todo lo ancho del papel, un indicador para el operador y como salida el mismo papel. El sistema no interfiere con el traslado del papel.

El sistema está trabajando en todo momento y cuando sense alguna parte de sustrato sin *primer*, parará automáticamente el proceso o le mandará una alerta al operador para detener el proceso manual y tomar medidas.

- ¿Qué tan interesado estarías en comprar una máquina con alimentador, proceso, sistema de calidad y apilador/rebobinador, que solucione tu problema de aplicación de *primer*?
- ¿Qué tan interesado estarías en comprar solamente el sistema de calidad, que se pueda montar en las máquinas de aplicación de *primer* y/o en las de impresión, que te indique cuando el papel esté mal tratado para que puedas en ese momento parar las máquinas y tomar las medidas adecuadas para evitar el gasto de sustrato, *primer*, tintas y horas máquina?

## Anexo 5. Área de control



## Anexo 6. Diseño de experimentos

Factores del proceso								
Factores	Unidades	Controlable	Variable en el experimento	Valor	Tipos	Niveles	Rango	Resolución
Área de sustrato	cm <sup>2</sup>	Si	No	10x15	-	-	-	-
Humedad relativa	%	Si	No		-	-		-
Tensión sustrato	dinas/10e-5 N	Si	No		-	-		-
Temperatura ambiental	°C	Si	No		-	-	20-25	-
Almacenamiento sustrato con primer	Días	Si	No		-	-		-
Polvo ambiental	#partículas/cm3	No	No					
Variabilidad de sustrato	%error experimental	No	Si - Error experimental		-	-	-	-
Variabilidad de primer	%error experimental	No	Si - Error experimental		-	-	-	-
Tipo <i>primer</i>		Si	No		1	-	-	-
Energía superficial	Dinas	Si	No					

Entrada								
Entradas	Unidades	Controlable	Variable en el experimento	Valor	Tipos	Niveles	Rango	Resolución
Cantidad de <i>primer</i>	gr/m <sup>2</sup>	Si	Si		-	5	0-2	
Tipo sustrato		Si	Si		3	-	-	-
Gramaje sustrato	gr/m <sup>2</sup>	Si	Si			3	70-200	1

Salidas	Unidades	Niveles	Rango
Luminancia sección 1	[Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> ]	-	
Luminancia sección 2 antes y después	[Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> ]	-	
Luminancia sección 3 antes y después	[Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> ]	-	
Prueba con tinta sección 3	cualitativo	2	no pasa-pasa

## Anexo 7. Diseño de experimentos

Factores del proceso								
Factores	Unidades	Controlable	Variable en el experimento	Valor	Tipos	Niveles	Rango	Resolución
Calibración sensor		Si	No	-	-	continuo	-	-
Ángulo	°	Si	No	90°				
Humedad relativa	%	Si	No	-	-	-		-
Tensión sustrato	dinas ó 10e-5 N	Si	No	-	-	-		-
Temperatura	°C	Si	No	-	-	-	20-25	-
Luz ambiental		Si	No		-	-	-	-
Almacenamiento	Días	Si	No	-	-	-		-
Polvo		No	No	-				
Variabilidad de sensor	%error experimental	No	Si - Error experimental	-	-	-	-	-
Variabilidad de muestras	%error experimental	No	Si - Error experimental	-	-	-	-	-

Entrada								
Entradas	Unidades	Controlable	Variable en el experimento	Valor	Tipos	Niveles	Rango	Resolución
Altura	mm	Si	Si		-	continuo	0-300	continuo
Sensor		Si	Si	-	x	-	-	-
Muestra validada	$[Wm^{-2}sr^{-1}]$	Si	Si	-	-	3x3	-	-

Salidas	Unidades	Niveles	Rango
Señal digital	Volts	2	0-vmax
Señal analógica	Volts	continuo	0-vmax